

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STAVEBNÍ

KATEDRA SILNIČNÍCH STAVEB



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

VYUŽITÍ R-MATERIÁLU V ASFALTOVÉ SMĚSI

2018

Jiří Jindra



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Thákurova 7, 166 29 Praha 6

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Jindra

Jméno: Jiří

Osobní číslo: 440831

Zadávací katedra: K136 - katedra silničních staveb

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Konstrukce a dopravní stavby

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce: Nízkoúdržbové asfaltové kryty

Název bakalářské práce anglicky: Low-service demanding asphalt surfacings

Pokyny pro vypracování:

- zpracování odborné rešerše zaměřené na asfaltové směsi využitelné v konceptech vozovek s dlouhou životností a v konceptech tenkých obrusných vrstev
- posouzení zahraničních přístupů a jejich porovnání s praxí v ČR (zejména směsi typu VMT, případně směsi ACL 16S/ACL 22S)
- provedení vybraných laboratorních zkoušek u variant asfaltových směsí obrusné a ložní vrstvy zkušebního úseku II/236 (Kačice), zejména stanovení modulu tuhosti, vodní citlivosti, odolnosti proti šíření trhliny, odolnost proti trvalým deformacím, včetně porovnání s vývrty odebranými v místě
- vyhodnocení inovativních typů asfaltové směsi a jejich porovnání s původními návrhy

Seznam doporučené literatury:

- technické normy a TP vztahující se k asfaltovým směsím typu SMA L, VMT, RBL, SMA NH, BBTM
- AASHTO, Guide for the Local Calibration of the Mechanical-Empirical Pavement 553 Design Guide, ed. Joint Technical Committee on Pavements 2010, Washington DC
- Timm, D.H., Willis, J.R., Forensic Investigation of a Rich-Bottom Pavement, NCAT Report 06-04, 2006
- NCHRP reporty vztahující se k problematice asfaltových vozovek s dlouhou životností
- další dle konzultací s vedoucím práce.

Jméno vedoucího bakalářské práce: Ing. Jan Valentin, Ph.D.

Datum zadání bakalářské práce: 19.02.2018

Termín odevzdání bakalářské práce: 27.05.2018

Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v bakalářské práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

23.2.2018

Datum převzetí zadání

Jindra

Podpis studenta(ky)

ANOTACE

V této bakalářské práci jsou měřeny vlastnosti dvou nových typů asfaltových směsí pro ohrusné vrstvy a jednoho typu asfaltové směsi pro ložní vrstvy. Jedná se o směsi SMA 8NH, SMA 22L a BBTM 8NH s určitým podílem recyklovaného kameniva (R-materiálu splňujícího požadavky normy ČSN EN 13108-8). Kombinace zmíněných typů směsí pro ohrusné a ložní vrstvy by mohla vytvářet relativně účinné krytové souvrství. Zároveň by toto souvrství za předpokladu vhodného návrhu a volby vstupních materiálů mohlo vést ke vzniku tzv. nízkoúdržbového krytu. Jsou zkoumány změny těchto vlastností v závislosti na velikosti podílu recyklátu, a to v kombinaci s uplatněním simulovaného dlouhodobého stárnutí v laboratorních podmínkách. Z hlediska využití recyklovaného kameniva je předpokládán pozitivní vliv na životnost vozovek při užití těchto asfaltových směsí.

KLÍČOVÁ SLOVA

asfaltová směs, recyklát, údržba, kamenivo, modul tuhosti, šíření trhliny, poježdění kolem

ABSTRACT

This bachelor thesis deals with a determination and assessment of material properties of two new types of asphalt mixtures for surface course and one asphalt mixture for binder course. For the purpose of this thesis mixtures SMA 8NH, SMA 22L and BBTM 8NH with specific content of recycled aggregate (reclaimed asphalt according to requirements specified in technical standard ČSN EN 13108-8) were researched. Combination of these mixtures for surface course and binder course could create quite effective pavement structure with extended life-time and reduce demands for periodical repairs and rehabilitation works. Furthermore, this structure, assuming suitable project and choice of primary materials, could lead towards development of low-service demanding asphalt surfacing. Changes of the properties of these asphalt mixtures were researched in connection with long-term ageing, which was simulated in a laboratory. From the point of view of using reclaimed asphalt a positive influence on pavement lifespan is expected in cases where these asphalt mixtures are used.

KEYWORDS

asphalt mixture, reclaimed asphalt, maintenance, aggregates, stiffness modulus, crack propagation, wheel tracking test

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně. Veškeré informační zdroje, které jsem při zpracovávání použil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval panu Ing. Janu Valentinovi, Ph.D., vedoucímu bakalářské práce, za odborné vedení, cenné rady a připomínky, které mi byly velmi nápomocny při zpracování této práce. Zároveň bych rád poděkoval Jaroslavu Kasalickému, Ing. Pavle Vackové a ostatním zaměstnancům silniční laboratoře za pomoc a ochotu při přípravě vzorků a laboratorních zkouškách. V neposlední řadě děkuji své rodině a přátelům za pomoc při eliminaci stylistických vad a nedostatků a podporu během dosavadního studia.

OBSAH

1	ÚVOD	8
1.1	VOZOVKY S DLOUHOU ŽIVOTNOSTÍ	9
1.2	DRUHY TRHLIN.....	9
2	POUŽITÉ MATERIÁLY	11
2.1	RECYKLOVANÉ KAMENIVO	11
2.2	ASFALTOVÁ SMĚS SMA 8NH (pro ohrusné vrstvy se sníženou hlučností)	11
2.3	ASFALTOVÁ SMĚS MASTIXOVÉHO TYPU PRO LOŽNÍ VRSTVY – SMA 22L	13
2.4	ASFALTOVÁ SMĚS BBTM 8NH (pro ohrusné vrstvy se sníženou hlučností)	14
3	PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES	16
3.1	VÝROBA MARSHALLOVÝCH TĚLES	16
3.2	VÝROBA DESEK	17
4	MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES	18
4.1	STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI SMĚSI	18
4.2	MĚŘENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU	18
4.3	MĚŘENÍ MODULU TUHOSTI	19
4.4	MĚŘENÍ TRHLIN	19
4.5	ZKOUŠKA POJÍŽDĚNÍ KOLEM	21
5	VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK	22
5.1	MODULY TUHOSTI – NEZESTÁRNUTÁ ZKUŠEBNÍ TĚLESA	22
5.1.1	ASFALTOVÁ SMĚS SMA 8NH	22
5.1.2	ASFALTOVÁ SMĚS SMA 22L	22
5.1.3	ASFALTOVÁ SMĚS BBTM 8NH	23
5.2	MODULY TUHOSTI – ZKUŠEBNÍ TĚLESA PO LABORATORNÍM STÁRNUTÍ	24
5.2.1	Asfaltová směs SMA 8NH	24
5.2.2	Asfaltová směs SMA 22L	26
5.2.3	Asfaltová směs BBTM 8NH	28
5.3	PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU A MODUL PRUŽNOSTI	29
5.3.1	Asfaltová směs SMA 8NH	29
5.3.2	Asfaltová směs SMA 22L	30
5.3.3	Asfaltová směs BBTM 8NH	30
5.4	VÝSLEDKY MĚŘENÍ TRHLIN	31
5.4.1	Asfaltová směs SMA 8NH	31
5.4.2	Asfaltová směs SMA 22L	33
5.4.3	Asfaltová směs BBTM 8NH	37

5.5	VÝSLEDKY ZKOUŠKY POJÍŽDĚNÍ KOLEM.....	39
5.5.1	Asfaltová směs SMA 8NH	39
5.5.2	Asfaltová směs SMA 22L.....	39
5.5.3	Asfaltová směs BBTM 8NH	40
6	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ.....	41
7	ZÁVĚR	43
8	PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY.....	44
9	PŘÍLOHY	45
9.1	Výsledky měření modulu tuhosti.....	45
9.2	Výsledky měření modulu tuhosti u těles po stárnutí	47
9.3	Výsledky zkoušek šíření trhliny.....	49
9.4	Protokoly ze zkoušky pojíždění kolem.....	52

1 ÚVOD

S markantním rozvojem silniční dopravy rapidně vzrůstají nároky na vozovky pozemních komunikací. Značné požadavky jsou v dnešní době kladeny především na obrusné vrstvy, v širším kontextu se však také oprávněně požadují zvýšené nároky na celé krytové souvrství. Základním a nejrozšířenějším kompozitním materiálem používaným pro tyto vrstvy je již po mnoho desetiletí asfaltová směs. Tato směs se skládá z kameniva a asfaltového pojiva (2 fázový systém u litých asfaltů), případně ještě obsahuje vzduchové mezery (3 fázový systém u hutněných asfaltových směsí). Masivní rozšíření asfaltové směsi v obrusných vrstvách vozovek má základ především v její nižší ceně a kratší době pokládky ve srovnání např. s vozovkami s cementobetonovým krytem.

Jednou z negativních vlastností asfaltových vozovek je vznik a rozvoj trvalých deformací, existuje však i celá řada dalších potenciálních poruch, kterým mají asfaltové vrstvy co nejvíce předcházet. Jedná se především o různé druhy trhlin (příčné, podélné, mozaikové a síťové), ztrátu drsnosti (ztráta mikro- a makrotextury), deformace krytu (hrboly, podélné vlny a koleje) a další konstrukční poruchy. Tyto poruchy znamenají jednak snížení jízdního komfortu, horší ekonomiku jízdy, v krajním případě až ohrožení bezpečnosti provozu. Dalším důležitým faktorem, zejména v hustě obydlených oblastech, jsou opravy těchto poruch. Časté opravy krytu vedou k dopravním komplikacím, nižší propustnosti komunikace, zvyšování časových ztrát uživatelů pozemní komunikace a v neposlední řadě ke zvýšenému hluku a znečištění v dané lokalitě.

Po celém světě a zejména v západní Evropě a Severní Americe narůstají tendence k vývoji asfaltového krytu, u kterého by byly zásadně sníženy požadavky na údržbu (tzv. nízkoúdržbový kryt), resp. u kterého by došlo k optimalizaci cyklů periodických oprav a ke zrychlení vlastního procesu provádění jednotlivých zásahů údržby a oprav znamenajících například výměnu některé z konstrukčních vrstev. Dalším velmi silnou motivací tohoto vývoje je dopad výroby asfaltových směsí na životní prostředí. Spolu s vývojem nízkoúdržbového krytu je rovněž propagována snaha co nejvíce používat recyklované kamenivo, které vzniká odstraněním původních konstrukčních vrstev nebo celé vozovky.

Trvanlivost ložné vrstvy hraje rozhodující roli při návrhu vozovky s dlouhou životností (viz. kapitola 1.1). U tohoto typu vozovek se totiž předpokládá pouze pravidelná výměna obrusné vrstvy bez nutnosti zásahu do ložních a podkladních vrstev v průběhu životnosti.

Tato práce se zaměřuje ve velké míře na použití recyklovaného kameniva v asfaltové směsi. Byl zkoumán vliv této minerální příměsi na charakteristiky směsi jako je maximální objemová hmotnost, množství asfaltového pojiva, modul tuhosti, pevnost v příčném tahu a další. Recyklované kamenivo bylo použito v různém procentním zastoupení ve 3 asfaltových směsích. Jednalo se o směsi SMA 8NH, SMA 22L a BBTM 8NH. Pro porovnání a určení specifických trendů bylo původním cílem spolu s vzorky odebraných asfaltových směsí z jejich pokládky provést rovněž měření a posouzení vzorků z jádrových vývrtů, které by se odebraly na silnici II/236 mezi obcemi Kačice a Smečno (okres Kladno). Na této pozemní komunikaci byly pilotně a jako forma zkušebního úseku dané směsi aplikovány. Jako ložní vrstva byla v celém sledovaném úseku položena asfaltová směs SMA 22L v tloušťce 100 mm. Na tuto vrstvu byla následně položena obrusná vrstva z asfaltových směsí SMA 8NH a BBTM 8NH v tloušťce 40 mm, resp. 30 mm. Obrusná vrstva se skládá z několika úseků, které se liší typem asfaltové směsi a množstvím použitého R-materiálu ve směsi. Cílem práce tedy nebylo vlastní směsi vyvíjet a laboratorně optimalizovat, ale provést jejich posouzení s využitím vhodných zkušebních metod a zahrnutím vlivu simulovaného stárnutí. S přihlédnutím ke skutečnosti, že se nepodařilo se správcem pozemní komunikace do poloviny května 2018 nalézt vhodný termín pro provedení zkušebních vývrtů, bylo přistoupeno k porovnání jednotlivých typů a variant asfaltových směsí s výsledky referenčních směsí,

kteře vyplývaly z protokolů o počáteční zkoušce typu. Tyto protokoly a původní laboratorní návrhy výchozích asfaltových směsí byly provedeny v silniční laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

Výchozím předpokladem při návrhu a pozdějším posouzení jednotlivých asfaltových směsí byl jejich přiměřený soulad s počátečními zkouškami typu. Dle těchto protokolů byly stanoveny prvotní hodnoty parametrů jednotlivých směsí, s nimiž byly následně porovnávány výsledky provedených měření.

1.1 VOZOVKY S DLOUHOU ŽIVOTNOSTÍ

Jedním z trendů, který je v současné době zkoumán v silničním stavitelství je vývoj tzv. „vozovek s dlouhou životností“ (LLP – Long Life Pavements). Koncept těchto vozovek spočívá v pokládce tenké obrusné vrstvy a zhotovení podkladních vrstev s vyšší tloušťkou. U této konstrukce se předpokládá pouze pravidelná výměna obrusné vrstvy, bez nutnosti zasahovat po dobu 20 – 25 let do ložní či horní podkladní asfaltové vrstvy, protože tyto vrstvy jsou navrženy a realizovány tak, aby v nich během životnosti nedocházelo ke zhoršování jejich vlastností.

Poněkud odlišný přístup se uplatňuje v USA. Zde je používán termín „věčná vozovka“ (perpetual pavement). Spočívá v konstrukci s velkou tloušťkou, která v sobě zahrnuje celkem 3 konstrukční vrstvy. Jedná se o obrusnou vrstvu odolnou vůči opotřebení, ložní vrstvu se zvýšenou odolností proti vytváření trvalých deformací a podkladní vrstvu odolnou vůči únavovým deformacím. U tohoto typu vozovek je návrhová životnost minimálně 50 let. ^[12]

Toto řešení přináší řadu pozitiv v ekonomické (úspora nákladů na údržbu), environmentální (menší spotřeba neobnovitelných přírodních zdrojů, jako je kamenivo a asfalt) a sociální oblasti (především v intravilánu menší zátěž hlukem a exhalacemi ze staveništní dopravy).

1.2 DRUHY TRHLIN

Vznik a šíření trhliny se řadí mezi jednu z klíčových skupin poruch a do značné míry se projevují na životnosti a trvanlivosti asfaltové vrstvy. Ty se také dle technických podmínek TP 82 ^[22] zařazují mezi ze základních poruch asfaltových vozovek. Mezi nejčastější příčiny jejich vzniku patří pronikání vody do konstrukce, působení slunečního světla (UV záření), únavové namáhání způsobené těžkou nákladní dopravou a náhlé změny teploty. ^[20] Po jejich vzniku (například v důsledku náhlých teplotních změn nebo trvale nízkých teplot) se do nich dostává voda a nečistoty. To přispívá k dalšímu rozšiřování trhliny a její propagaci hlouběji do krytového souvrství.

Příčné trhliny se dále dělí na úzké, široké a rozvětvené. Úzké trhliny zasahují maximálně do šířky 5 mm a vyskytují se ojediněle v pravidelných, nebo nepravidelných intervalech. Široké trhliny mají podobnou frekvenci výskytu jako úzké, ale dosahují větších šířek (nad 5 mm). Rozvětvená trhlina je kombinací příčné trhliny a přidružených mozaikových trhlin se začínajícími výtluky. Výskyt je opět ojedinělý s rozšiřováním do větších ploch.

Podélné trhliny mají stejné dělení jako příčné, tedy úzké, široké a rozvětvené. Úzké trhliny mají šířku do 5 mm a jsou buď přerušované, nebo souvislé v celé délce vozovky. Široké trhliny jsou širší než 5 mm a mají zpravidla souvislý výskyt po délce vozovky. Rozvětvená trhlina je kombinací podélné trhliny a přidružených mozaikových trhlin se začínajícími výtluky. Výskyt je zpravidla souvislý v různé šířce.

Mozaikové trhliny se často vyskytují v kombinaci s výše uvedenými druhy trhlin. Příčinou jejich vzniku je zpravidla nedokonalé spojení vrstev krytu, nepoužití celoplošného spojovacího postřiku nebo

znečištění podkladu před pokládkou nové asfaltové vrstvy. Tento druh trhlin významně ovlivňuje trvanlivost asfaltového krytu.

Sítové trhliny zasahují všechny stmelené vrstvy vozovky a jsou doprovázeny deformacemi. Velikost ok je přibližně 10 – 40 cm dle tloušťky vrstvy. Výskyt je buď ojedinělý na malých plochách nebo souvislý až na celou šířku vozovky. ^[19]

2 POUŽITÉ MATERIÁLY

2.1 RECYKLOVANÉ KAMENIVO

V současné době lze použít asfaltový R-materiál u akustických asfaltových vrstev maximálně v množství, které nepřesahuje 20 % celkové hmotnosti asfaltové směsi (kromě směsi typu BBTM, kde je jeho použití normou zakázáno). Při množství R-materiálu přesahující 10 % hmotnosti asfaltové směsi je nutno spolu s protokolem o zkoušce typu předložit technologický předpis na získávání, skladování, úpravu a zkoušení R-materiálu v souladu s normou ČSN EN 13108-8, případně dle TP 210. Zároveň musí být splněny požadavky stanovené v TKP 7 a TKP 8. ^[21]

Veškeré kamenivo použité ve zkušebních asfaltových směsích pocházelo z obalovny společnosti Froněk s.r.o. Jednalo se lomy v obcích Brant a Sýkořice (obě v okrese Rakovník). U směsi SMA 22L bylo použito kamenivo z obou výše zmíněných lomů, u směsi BBTM 8NH a SMA 8NH pak pouze kamenivo z lomu Sýkořice. Pro všechny posuzované asfaltové směsi nebyl využit recyklovaný materiál (znovuzískaná asfaltová směs) z konkrétní stavby, ale bylo použito recyklované kamenivo (R-materiál) získané předrcením a přetříděním znovuzískané asfaltové směsi z více staveb. Vlastní asfaltové směsi byly odebrány při pokládce jednotlivých vrstev v říjnu 2017.

2.2 ASFALTOVÁ SMĚS SMA 8NH (pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností)

Tato směs byla vyvinuta v 70. letech v Německu pro použití v obrusné vrstvě. Vyznačuje se přerušenou čarou zrnitosti a vysokým obsahem hrubého kameniva. Je vhodná pro pozemní komunikace a plochy s velkým dopravním zatížením, protože vykazuje vysokou odolnost proti tvorbě trvalých deformací a mrazových trhlin.

Výroba tohoto typu asfaltové směsi se řídí podmínkami definovanými v TKP 7^[24]. Při dávkování jednotlivých složek směsi, stejně jako při určení délky doby míchání se uplatní stejné postupy jako běžné směsi typu SMA. Výroba probíhá v běžných obalovnách.

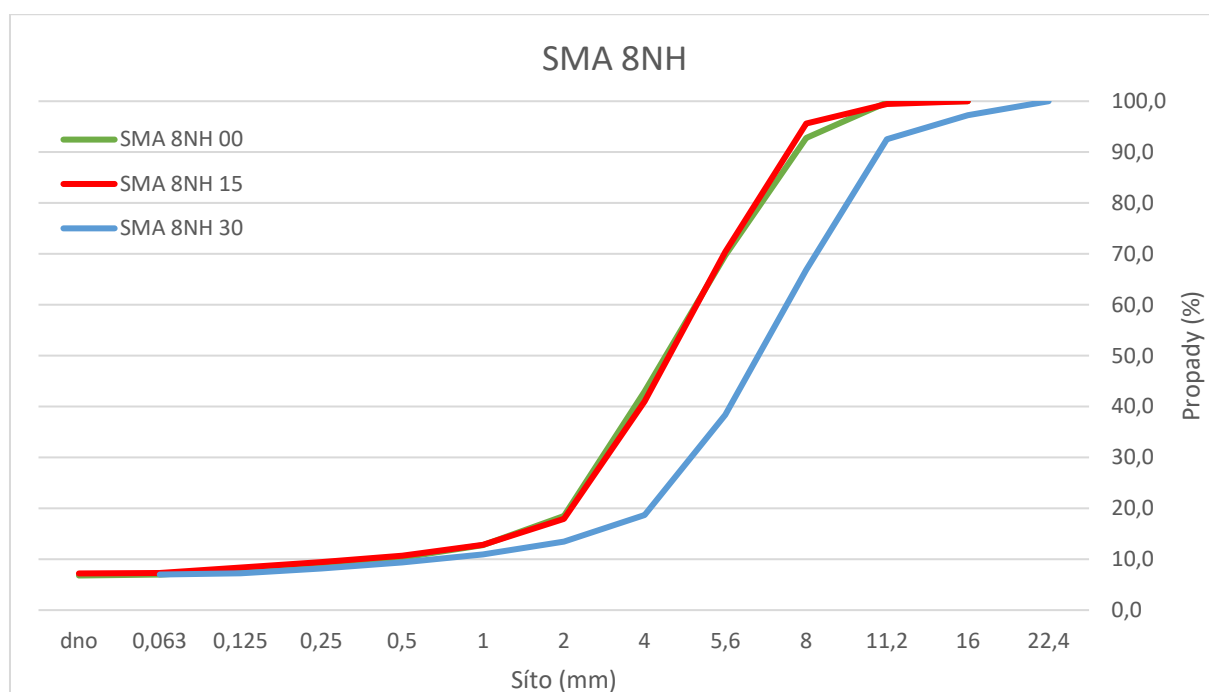
Asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností lze použít takřka pro jakoukoli pozemní komunikaci, pokud budou splněny předpoklady obsažené v technických podmínkách TP 259^[14]. Nicméně jejich použití není doporučeno ve směrových obloucích malých poloměrů, na okružních křižovatkách a na dalších úsecích, kde vznikají velké tangenciální síly. Jsou pokládány zpravidla v tloušťce 35 mm (tenké vrstvy), nebo 25 mm (ultratenké vrstvy). U tohoto typu směsi není předpokládán významnější vliv na celkové krytové souvrství. ^[17]

V současné době není v České republice dle platných norem u této směsi povoleno použití recyklovaného kameniva. ^[14] Směs s příměsí R-materiálu byla položena na zkušebním úseku na silnici II/236 mezi obcemi Kačice a Smečno (okres Kladno) za účelem dlouhodobého sledování vlivu R-materiálu na chování a životnost obrusné vrstvy. Na tomto úseku bude vliv recyklovaného kameniva na vlastnosti asfaltové směsi dále monitorován, aby bylo možno později přesněji definovat doporučení pro využívání R-materiálu u tohoto typu asfaltových směsí.

Pro tuto směs lze využít buď polymerem modifikované asfalty (dle ČSN EN 14023, resp. ČSN 65 7222-1), nízkoviskózní průmyslově vyrobená asfaltová pojiva (splňující požadavky uvedené v TP 238, příloha C, resp. ČSN 65 7222-3), nebo asfaltová pojiva modifikovaná pryží (dle ČSN 65 7222-2 nebo TP 148, přičemž výrobce vždy prokáže vhodnost Stavebně-technickým osvědčením). V případě směsi SMA 8NH je vhodné aplikovat vhodné přísady (celulózo- či minerální vlákna) pro omezení stékavosti asfaltového pojiva. Použití velmi tvrdých gradací asfaltů nebo ztužujících přísad je nepřípustné. ^[21]

Směs byla vyrobena celkem ve 3 variantách, dle velikosti podílu recyklovaného kameniva. Jednalo se o varianty SMA 8NH 00 (0 % R-materiálu), SMA 8NH 15 (15 % R-materiálu) a SMA 8NH 30 (30 % R-materiálu). Všechny použité varianty směsi se vyznačovaly vyšší hodnotou mezerovitosti (11 – 13 %), protože tato směs byla původně navržena jako tzv. nízkohlučná. Hodnoty mezerovitosti jsou mírně vyšší, než uvádí protokol o zkoušce typu, tedy 10,2 %, plně však splňují požadavky stanovené technickými podmínkami TP 259. Německé předpisy z hlediska mezerovitosti připouštějí hodnoty 9,0 do 14,0 %. ^[15] Maximální objemová hmotnost se u jednotlivých variant asfaltové směsi pohybovala v rozmezí od 2,560 do 2,588 g/cm³. Byla rovněž provedena extrakce, po níž bylo určeno množství asfaltového pojiva a čára zrnitosti použitého kameniva.

Podíl zrn drobného drceného kameniva je u této směsi nižší, což se dále projeví ve struktuře směsi. Přesný průběh křivky zrnitosti pro všechny 3 varianty této směsi je v níže uvedeném grafu. Vliv R-materiálu se projevuje především u varianty SMA 8NH s 30 % R-materiálu posunutím čáry zrnitosti na svislé ose propadů směrem dolů. Tato varianta má tedy mírně vyšší obsah hrubších frakcí kameniva.



Graf 1: Křivky zrnitosti použitého kameniva u jednotlivých variant asfaltové směsi SMA 8NH

Použitým asfaltovým pojivem byl polymerem modifikovaný asfalt s hodnotou penetrace 45/80 a bodem měknutí minimálně 65 °C (PMB 45/80-65 dle ČSN EN 14023 resp. ČSN 65 7222-1). PMB pojiva mají obecně rozšířený obor plasticity a vyšší penetrační index než běžně používaná asfaltová pojiva. Pojivo použité v této směsi má oproti ostatním pojivům tohoto typu vyšší obsah SBS polymeru. Obsah pojiva je obecně u směsí typu SMA vyšší než např. u směsí typu BBTM nebo většiny asfaltových betonů pro obrusné vrstvy. U směsi SMA 8NH byl obsah asfaltového pojiva navíc vyšší než u směsi SMA 22L, a to v průměru o pětinu. Tento fakt je v zásadě logický, protože při porovnání asfaltových směsí pro ložní a obrusné vrstvy je vždy kladen důraz na to, aby s ohledem k umístění a typům účinků (doprava – přímý kontakt s pneumatikou, klimatické podmínky) byl podíl pojiva u asfaltové směsi pro obrusné vrstvy mírně vyšší. Navíc je zde posuzována směs pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností, které mají zvýšenou mezerovitost a více zalomenou čáru zrnitosti (dominance jednoho typu úzké frakce), což samo o sobě dle platných předpisů vyžaduje mírně vyšší množství použitého asfaltového pojiva. Níže uvedená tabulka ukazuje obsah pojiva u jednotlivých variant směsi. U varianty směsi s 30 % recyklovaného kameniva je vidět výrazný nárůst množství pojiva, zatímco u varianty s 15 % R-materiálu

a varianty bez R-materiálu je hodnota vcelku obdobná. Dle platné normy je požadavek na minimální hodnotu množství asfaltového pojiva 6,2 % ^[14]. Protokol o zkoušce typu uvádí množství pojiva 6,5 %.

Obsah pojiva (%)	
SMA 8NH 00	6,0
SMA 8NH 15	5,8
SMA 8NH 30	6,6

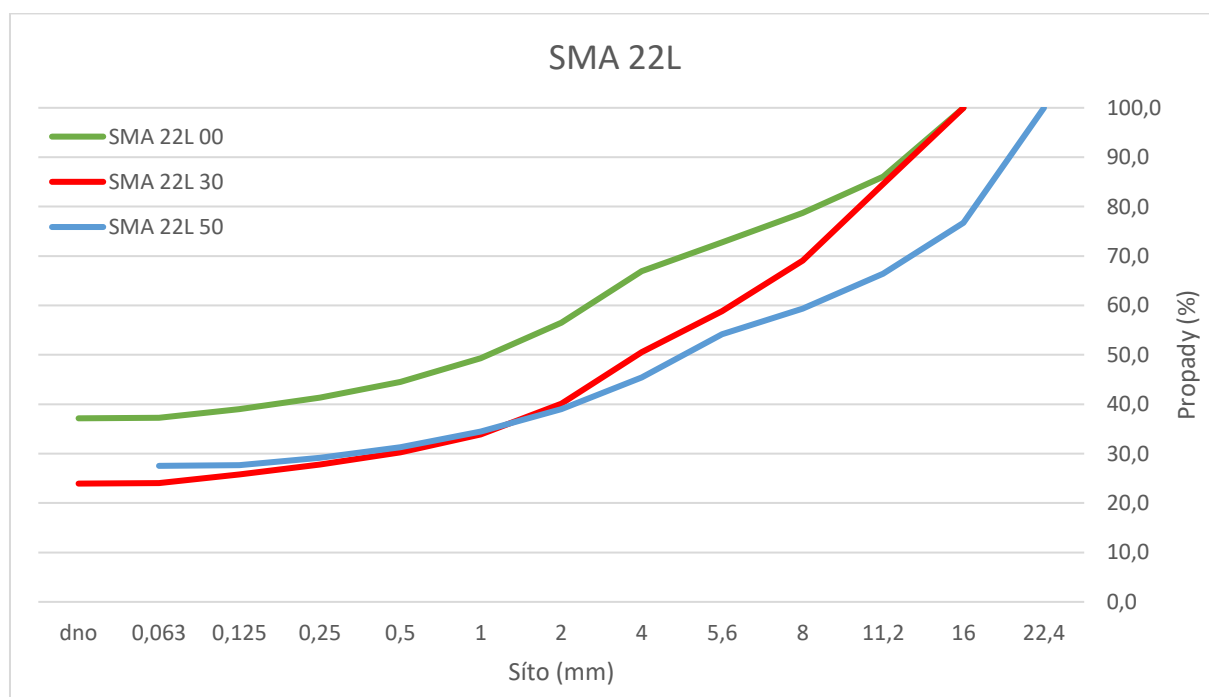
Tab. 1: Obsah asfaltového pojiva v jednotlivých variantách asfaltové směsi SMA 8NH

2.3 ASFALTOVÁ SMĚS MASTIXOVÉHO TYPU PRO LOŽNÍ VRSTVY – SMA 22L

Stejně jako směs SMA 8NH, i tato směs se vyznačuje vyšší odolností vůči trvalým deformacím a menší náchylností ke vzniku trhlin v důsledku mechanického nebo teplotního namáhání. ^[11] Vedle toho lze předpokládat, že tato směs v kombinaci s polymerem modifikovaným asfaltem může mít zvýšenou únavovou životnost. Tato skutečnost však nebyla nijak podrobně v rámci experimentálního posouzení ověřována ani podrobněji rozvíjena.

I tato směs byla použita ve 3 variantách, dle velikosti podílu R-materiálu. Jednalo se o varianty SMA 22L 00 (0 % R-materiálu), SMA 22L 30 (30 % R-materiálu) a SMA 22L 50 (50 % R-materiálu). Mezerovitost u jednotlivých variant směsi činila 4,4 – 7,8 %. Při zkoušce typu byla dle protokolu naměřena nižší hodnota, a to 3,26 %. Požadavek byl stanoven na základě německých předpisů, které z hlediska mezerovitosti požadují hodnoty v rozmezí 3,0 – 4,0 %. ^[18] Maximální objemová hmotnost se pohybovala mezi 2,535 – 2,540 g/cm³. Také u této směsi byla provedena extrakce, po níž byla určena čára zrnitosti použitého kameniva a množství asfaltového pojiva.

Křivka zrnitosti u všech variant je poměrně plynulá, jak je vidět z níže uvedeného grafu. Podobně jako u směsi SMA 8NH je zjevný vliv R-materiálu, který se projevuje v posunutí čáry zrnitosti na svislé ose propadů směrem dolů.



Graf 2: Křivky zrnitosti použitého kameniva u jednotlivých variant asfaltové směsi SMA 22L

Použitým asfaltovým pojivem byl stejně jako u předchozí směsi polymerem modifikovaný asfalt s hodnotou penetrace 45/55 a bodem měknutí 60 °C (PMB 45/55-60 dle ČSN EN 14023 resp. ČSN 65 7222-1). Níže uvedená tabulka ukazuje obsah pojiva u jednotlivých variant směsi. Opět je patrný mírný nárůst množství pojiva u varianty směsi s 30 % recyklovaného kameniva, ale u varianty s vyšším podílem recyklátu se množství pojiva naopak mírně snižuje. Rozdíly mezi změřenými hodnotami jsou nicméně minimální.

Obsah pojiva (%)	
SMA 22L 00	5,1
SMA 22L 30	5,3
SMA 22L 50	4,9

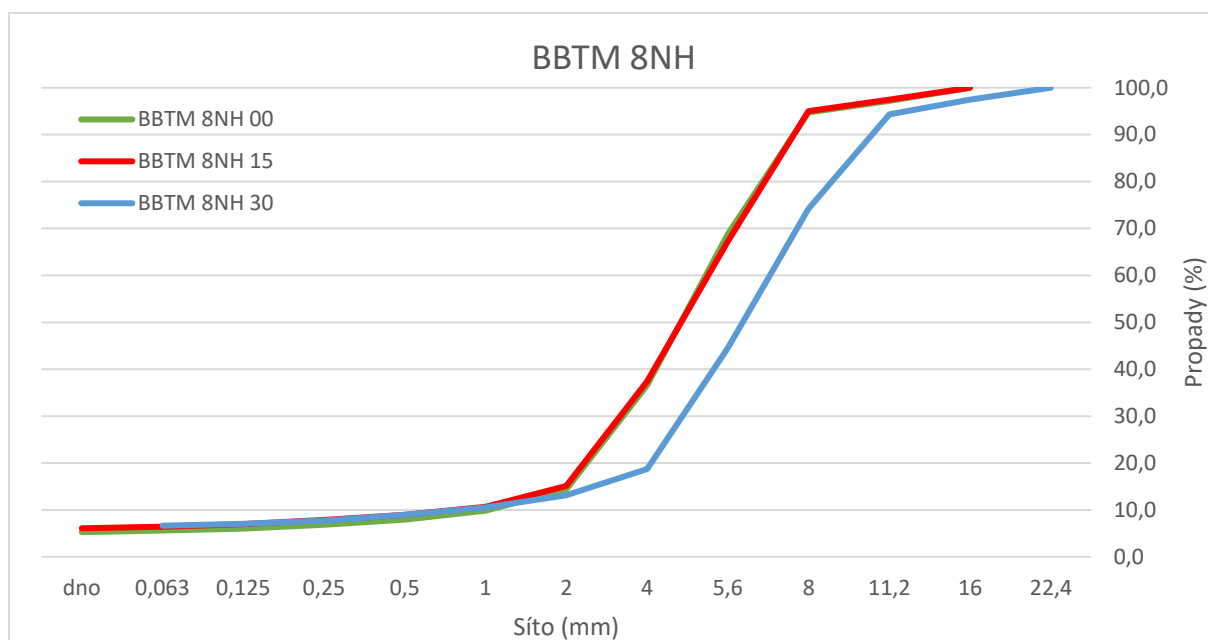
Tab. 2: Obsah asfaltového pojiva v jednotlivých variantách asfaltové směsi SMA 22L

2.4 ASFALTOVÁ SMĚS BBTM 8NH (pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností)

Tato směs je vhodná pro obrusné vrstvy vozovek všech tříd dopravního zatížení. Vykazuje nižší hlučnost než běžné směsi typu AC, a proto je klasifikována dle TP 259 jako asfaltová směs pro obrusné vrstvy, kde požadujeme dosažení snížené hlučnosti. Vhodnou mikro- a makrotexturou lze zajistit zlepšené protismykové vlastnosti. Jak vyplývá z názvu (asfaltový beton pro velmi tenké vrstvy) je tato směs kladena obvykle ve vrstvách tloušťky 20 – 30 mm. Dle obsahu drobného kameniva a jemných částic se tato směs dále dělí na typ A, B, nebo C. Dle tohoto dělení je pak výsledná mezerovitost nízká, střední nebo vysoká. Hodnoty mezerovitosti se pohybují od 2,5 do 15 %. ^[10] Samostatně je definována kategorie „NH“, která se vyznačuje intervalem povolené mezerovitosti v rozmezí hodnot od 10,0 % do 14,0 %. ^[14] Jako pojivo se používají polymerem modifikované asfalty (v souladu s ČSN EN 14023, resp. ČSN 65 7222-1), průmyslově vyrobená nízkoviskózní polymerem modifikovaná asfaltová pojiva s některou z chemických přísad nebo vosků (dle přílohy C technických podmínek TP 238, resp. ČSN 65 7222-3), nebo asfaltová pojiva modifikovaná pryží (dle ČSN 65 7222-2 nebo TP 148 výrobce vždy prokáže vhodnost Stavebně-technickým osvědčením). Obdobné podmínky platí pro asfaltovou směs SMA 8NH. Pro snižování pracovních teplot se připouští použití přísad, ale pouze v souladu s technickými podmínkami TP 238. ^[14]

Rovněž i tato směs byly použity ve 3 variantách, dle velikosti podílu R-materiálu. Jednalo se o varianty BBTM 8NH 00 (0 % R-materiálu), BBTM 8NH 15 (15 % R-materiálu) a BBTM 8NH 30 (30 % R-materiálu). Mezerovitost se u všech variant směsi pohybovala lehce nad 13 %. Hodnoty jsou opět mírně vyšší oproti hodnotám z protokolu o zkoušce typu, při níž byla naměřena mezerovitost 11,5 %. Tato skutečnost z hlediska principů a požadavků na obrusné vrstvy se sníženou hlučností není ke škodě a splňuje požadavky TP 259. Maximální objemová hmotnost se pohybovala mezi 2,647 – 2,682 g/cm³. Stejně jako u výše popsaných směsí typu SMA, i u této směsi byla provedena extrakce, po níž byla určena čára zrnitosti použitého kameniva a množství asfaltového pojiva.

Křivka zrnitosti u všech variant vykazuje malý podíl zrn drobného drceného kameniva. Frakce kameniva jsou odstupňovány tak, aby mohla vzniknout otevřená struktura. Průběh křivky zrnitosti je u všech variant podobný, jako u směsi SMA 8NH. Podobně jako u směsí SMA 8NH a SMA 22L je patrný vliv R-materiálu, který se projevuje u varianty s 30 % příměsí R-materiálu posunutím čáry zrnitosti na svislé ose propadů směrem dolů, tedy opět mírné zvýšení podílu zrn hrubších frakcí kameniva.



Graf 3: Křivky zrnitosti použitého kameniva u jednotlivých variant asfaltové směsi BBTM 8NH

Použité asfaltové pojivo byl stejně jako u směsí SMA polymerem modifikovaný asfalt s hodnotou penetrace 45/80 a bodem měknutí minimálně 65 °C (PMB 45/80-65 dle ČSN EN 14023 resp. ČSN 65 7222-1). Níže uvedená tabulka ukazuje obsah pojiva u jednotlivých variant směsi. U všech variant směsi zůstává obsah asfaltového pojiva konstantní. Naměřené hodnoty jsou ovšem nižší, než požaduje norma ^[14], která u tohoto typu asfaltové směsi udává minimální hodnotu množství asfaltového pojiva 5,3 %. Stejnou hodnotu uvádí i protokol o zkoušce typu vyhotovený pro tuto směs.

Obsah pojiva (%)	
BBTM 8NH 00	4,6
BBTM 8NH 15	4,6
BBTM 8NH 30	4,6

Tab. 3: Obsah asfaltového pojiva v jednotlivých variantách asfaltové směsi BBTM 8NH

Všechny směsi byly vyrobeny v obalovně společnosti Froněk s.r.o., která se nachází v obci Brant (okres Rakovník). Tato obalovna používá zařízení s technologií německé společnosti Benninghoven a je vybavena paralelním bubnem. Toto zařízení umožňuje přidávat do asfaltové směsi horkou cestou více jak 50 % R-materiálu. Obalovna pro tento účel k zahřátému R-materiálu přidává i oživovací přísady, které se v dnešní době obecně označují jako rejuvenátory. Jejich účelem je zlepšení některých vlastností zdegradovaného asfaltového pojiva v R-materiálu. Jedná se zejména o snížení hodnoty bodu měknutí a zvýšení penetrace. Tento účinek by přitom měl mít trvalejší charakter.

3 PŘÍPRAVA ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Všechna zkušební tělesa použitá pro jednotlivé laboratorní experimenty (Marshallova tělesa a desky) byla vyrobena v silniční laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

3.1 VÝROBA MARSHALLOVÝCH TĚLES

Všech 9 posuzovaných variant asfaltových směsí bylo nejprve zahřáto na 160 °C. Před samotnou přípravou vzorků bylo vždy odebráno 1000 – 1200 g asfaltové směsi pro zkoušku určení maximální objemové hmotnosti dle ČSN EN 12697-5.^[1] Během přípravy byly následně vyráběny vždy 2 typy zkušebních těles. První typ zkušebních těles měl hmotnost přibližně 1050 g a byl hutněn 2x25 úderů hutnického pěchu. Tato zkušební tělesa byla určena pro zkoušku stanovení odolnosti asfaltové směsi proti účinkům vody. Druhý typ zkušebních těles měl hmotnost 1150–1200 g a byl hutněn 2x50 úderů hutnického pěchu.

Odebrané navážky byly umístěny do předem připravených a nahřátých nádob (tzv. fanek) a dále 2 hodiny temperovány na 160 °C. Tento postup zajistil rovnoměrné prohřátí asfaltové směsi. Spolu s navážkami se rovněž temperovaly pomůcky pro přípravu těles (podložka, násypný trychtýř, válcová forma, horní nástavec a špachtle).

Po vytemperování byla sestavena hutnicí forma a pomocí špachtle a trychtýře do ní byla přesypána navážka, která byla následně ještě špachtlí urovňována. Případnému znečištění podložky nebo hutnického pěchu horkou asfaltovou směsí bylo zabráněno použitím separačních papírových podložek. Po zhutnění předepsaným počtem úderů byla forma rozebrána (dle potřeby byla očištěna podložka a hutnicí pěch) a hotové těleso ve válcové formě bylo umístěno na kovovou destičku k vychladnutí. Po vychladnutí bylo těleso z formy vytlačeno pomocí lisu a označeno nesmazatelnou značkou (číslicí) pro pozdější rychlou identifikaci.

Níže je uveden počet vzorků u jednotlivých směsí (počet vzorků hutněných 2x25 úderů + počet vzorků hutněných 2x50 úderů).

- SMA 8NH 00: 9 + 9
- SMA 8NH 15: 9 + 9
- SMA 8NH 30: 9 + 9
- SMA 22 L 00: 9 + 8
- SMA 22 L 30: 9 + 9
- SMA 22 L 50: 9 + 10
- BBTM 8NH 00: 9 + 6
- BBTM 8NH 15: 9 + 6
- BBTM 8NH 30: 9 + 6

Celkem bylo vyrobeno 153 Marshallových těles.

3.2 VÝROBA DESEK

Asfaltová směs byla nejprve opět nahřata na 160 °C. Poté byla odebrána navážka. Množství navážky bylo určeno na základě rozměrů desky a objemové hmotnosti zhutněných Marshallových těles. Spolu se směsí byly rovněž temperovány podkladní ocelová deska a plech, které se následně vložily do zhutňovacího zařízení, tzv. lamelového zhutňovače. Pro omezení nalepování směsi na formu na ni byl předem nanesen silikonový olej. Poté byla připevněna boční strana formy pomocí šroubů. Do formy byla následně nasypána navážka. Povrch se následně urovnal a zakryl ocelovým plechem. Na plech byly umístěny lamely a zhutňovač byl spuštěn. Zhutňovač pomocí hydraulického lisu přitlačuje hutnící válec a několika pojezdy se deska zhutní. Proces hutnění byl následně ještě dvakrát opakován, pokaždé v počtu 10 pojezdů. Tento postup simuluje reálné hutnění asfaltové směsi na stavbě. Po ukončení hutnění byla deska z lamelového zhutňovače vyjmuta a umístěna na vyhrazené místo, aby vychladla.

Celkem bylo vyrobeno 18 desek, 6 pro každý typ asfaltové směsi (2 od každé varianty, jak je standardně požadováno pro zkoušku odolnosti asfaltové směsi proti vzniku trvalých deformací). Rozměry vyrobených desek odpovídaly požadavkům obsažených v normě ČSN EN 12697-22+A1.^[6]

4 MĚŘENÍ ZKUŠEBNÍCH TĚLES

Veškerá měření vyrobených zkušebních těles probíhala v silniční laboratoři Fakulty stavební ČVUT v Praze.

4.1 STANOVENÍ MAXIMÁLNÍ OBJEMOVÉ HMOTNOSTI SMĚSI

Maximální objemová hmotnost byla měřena pomocí pyknometru volumetrickým postupem dle normy ČSN EN 12697-5 ^[1] dle rovnice:

$$\rho_{mv} = \frac{m_2 - m_1}{10^6 \cdot V_p - (m_3 - m_2) / \rho_w}$$

ρ_{mv} – maximální objemová hmotnost asfaltové směsi v Megagramech na kubický metr (Mg/m^3), s přesností 0,001 Mg/m^3

m_1 – hmotnost pyknometru, nástavce a pružiny v gramech (g)

m_2 – hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny a zkušební vzorku v gramech (g)

m_3 – hmotnost pyknometru, nástavce, pružiny, zkušební vzorku a vody nebo rozpouštědla v gramech (g)

V_p – objem pyknometru při naplnění po referenční značce nástavce v metrech kubických (m^3)

ρ_w – hustota vody v Megagramech na metr kubický

Hustota vody při zkoušce v závislosti na teplotě vody, ve které byla tělesa ponořena byla stanovena dle následujícího vztahu:

$$\rho_w = 1,000\,165\,84 + \frac{(7,93 \cdot t - 5,29 \cdot t^2)}{1\,000\,000}$$

ρ_w – hustota vody v Megagramech na kubický metr (Mg/m^3), s přesností 0,001 Mg/m^3

t – teplota vody ve stupních Celsia ($^{\circ}\text{C}$)

Zkušební tělesa, která byla hutněna 50 úderů byla nejprve zvážena za sucha, poté pod vodu a následně byla určena hmotnost osušených zkušebních těles dle ČSN EN 12697-6. ^[2] Ze získaných hodnot hmotnosti byla následně určena mezerovitost a maximální objemová hmotnost těchto těles. Z poměru mezi takto změřenou objemovou hmotností a maximální objemovou hmotností naměřenou volumetrickým způsobem (viz výše), byla stanovena mezerovitost jednotlivých variant asfaltové směsi.

4.2 MĚŘENÍ PEVNOSTI V PŘÍČNÉM TAHU

Zkušební tělesa, která byla hutněna 2x25 úderů byla dále rozdělena dle hodnoty objemové hmotnosti do tří skupin. První skupina zkušebních těles byla podrobena zkoušce za sucha při teplotě 15 $^{\circ}\text{C}$. Druhá skupina zkušebních těles byla nejprve plně nasycena pomocí exsikátoru a následně ponechána minimálně 72 hodin ve vodní lázni o teplotě 40 $^{\circ}\text{C}$. Třetí skupina zkušebních těles byla podrobena zkoušce dle modifikované metody specifikované americkou organizací AASHTO (American Association of State Highway and Transportation Officials). ^[16] V souladu s postupem uvedeným v tomto předpisu je těleso opět nejprve plně nasyceno pomocí exsikátoru. Následně je minimálně 16 hodin ochlazováno na teplotu -18 $^{\circ}\text{C}$ a poté ponecháno minimálně 24 hodin ve vodní lázni o teplotě 60 $^{\circ}\text{C}$.

Na těchto skupinách byla poté provedena zkouška pevnosti v příčném tahu (ITS). Princip zkoušky spočívá v namáhání tělesa v jednoosém příčném tlaku. Zatěžování je prováděno pomocí lisu, jehož

rychlost je stanovena normou na 50 mm/min. Ze záznamového zařízení, které je připojeno k lisu, byly následně odečteny hodnoty síly potřebné k porušení tělesa a příčné deformace. Z těchto údajů byly následně vypočteny hodnoty pevnosti v říčním tahu, poměrného přetvoření, modulu pružnosti. Z poměru průměrné pevnosti mokrých zkušebních těles a průměrné pevnosti suchých zkušebních těles byla poté vypočtena hodnota ITS_R (poměr pevností v příčném tahu) dle následujícího vztahu a v souladu s požadavky a principy stanovenými v normě ČSN EN 12697-12 ^[5]:

$$ITS_R = 100 * \frac{ITS_w}{ITS_d}$$

ITS_R – poměr pevností v příčném tahu v %

ITS_w – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny mokrých zkušebních těles v kPa

ITS_d – průměrná pevnost v příčném tahu skupiny suchých zkušebních těles v kPa

4.3 MĚŘENÍ MODULU TUHOSTI

Měření modulu tuhosti u zkušebních těles odpovídalo normě ČSN EN 12697-26. ^[7] Zkoušení probíhalo ve speciálním přístroji se servohydraulickým zatěžovacím pohonem. Před měřením při požadované teplotě byla zkušební tělesa vždy nejprve minimálně 4 hodiny temperována na požadovanou teplotu. Z hodnoty síly potřebné k vybuzení příčného přetvoření zkušební tělesa o 5 μm (resp. 3 μm při zkušební teplotě 0 °C) byly pomocí počítačového programu získány hodnoty modulu tuhosti jednotlivých zkušebních těles. Měření probíhala při teplotách 0 °C, 15 °C a 27 °C v termostatické komoře.

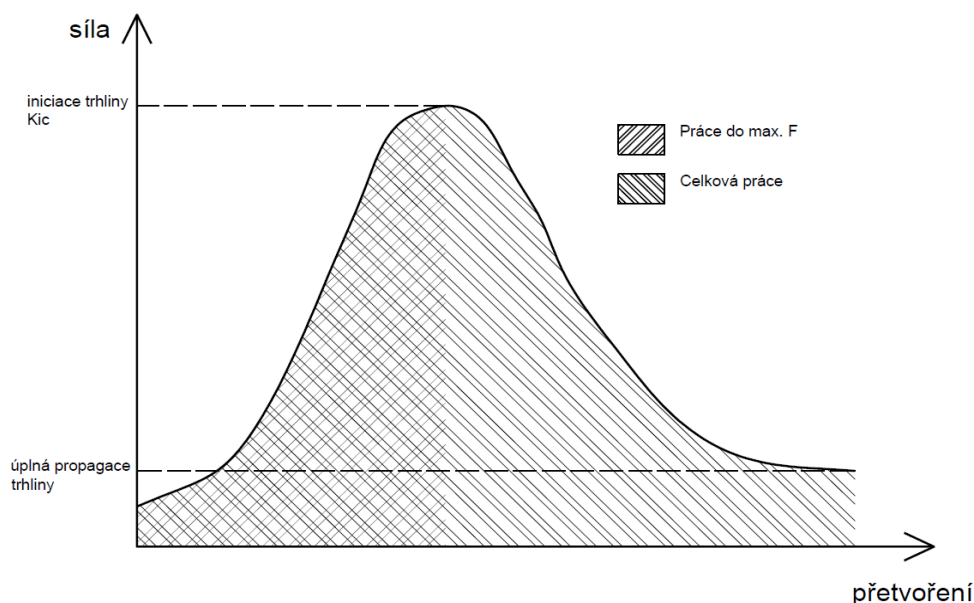
Poté byla předem vybraná zkušební tělesa vystavena procesu stárnutí. Tento proces je velmi důležitý kvůli zhodnocení chování asfaltové směsi v dlouhodobém měřítku, jakož i z hlediska skutečnosti, že asfaltové pojivo přirozeně podléhá vlivům stárnutí (temooxidativní degradace). V delším časovém horizontu se totiž v asfaltové směsi začínají projevovat trvalé deformace, dochází ke vzniku a propagaci teplotně indukovaných nebo únavových trhlin. Zároveň také k celkové degradaci asfaltového pojiva, která se projevuje zvyšováním jeho tuhosti při současném nárůstu křehkosti. Tyto aspekty je potřeba důkladně sledovat a pečlivě analyzovat, neboť mají zásadní vliv na životnost celé konstrukce vozovky. Aby bylo možné studovat chování zestárnuté asfaltové směsi v reálném čase, je nutné proces stárnutí aproximovat v laboratorních podmínkách. Pro napodobení procesu stárnutí byla zkušební tělesa vystavena teplotě 85 °C po dobu 5 dnů v klimatické komoře, kde byla zajištěna stálá cirkulace vzduchu (jeden z možných postupů dle prEN 12697-52). Po simulaci procesu stárnutí byl u zkušebních těles všech asfaltových směsí znovu změřen modul tuhosti při 0 °C a 15 °C. U asfaltové směsi SMA 22L byl dále ještě změřen modul tuhosti po stárnutí při teplotě 27 °C. Zkušební tělesa nezestárnutých asfaltových směsí i zestárnutých asfaltových směsí byla následně připravena pro zkoušku šíření trhliny ohybem na půlválcovém zkušebním tělese.

4.4 MĚŘENÍ TRHLIN

U dalších zkušebních těles bylo provedeno měření náchylnosti asfaltové směsi ke vzniku a šíření trhlin. Zkouška byla prováděna dle normy ČSN EN 12697-44. ^[8] Při tomto měření je zkušební těleso nejprve seříznuto na výšku cca 50 mm a poté rozříznuto podél vertikální osy na 2 stejné poloviny. Do každého z takto vzniklých půlválcových zkušebních těles je následně vyříznuta 10 mm drážka umístěná uprostřed tělesa. Díky tomuto opatření se koncentruje působící napětí do požadované oblasti. Také lze předem určit oblast, kde ve zkušebním tělese dojde ke vzniku trhliny. Těleso je poté s využitím principu tříbodové zkoušky zatěžováno. Ze získaných hodnot je poté určena jednak lomová houževnatost a také práce nutná k propagaci trhliny na povrch vzorku. Z množství práce vykonané při

propagaci trhliny pak lze určit přibližnou časovou rychlost s níž se trhlina prokopíruje, resp. v čase může prokopírovat na povrch vozovky v reálné konstrukci. Jedná se tedy o vhodnější ukazatel chování asfaltové směsi v porovnání s lomovou houževnatostí, jak ji vymezuje jako určující charakteristiku ČSN EN 12697-44.

Následující pracovní diagram ukazuje průběh přetvoření zkušebního půlválcového tělesa v závislosti na působící síle. Je znázorněna práce pro vyvolání maximální síly a celková práce vykonaná při zkoušce. Rovněž je znázorněn okamžik iniciace trhliny a následně okamžik její úplné propagace.



Graf 4: Pracovní diagram šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese

Většina zkušebních postupů používaných v Evropě se zabývá pouze kritickou hodnotou napětí, při němž dochází k iniciaci trhliny. Naproti tomu měření při analýzách nízkoteplotního chování asfaltových směsí pro tuto práci se zabývala i dalšími hodnotami. Jednak se zkoumala celková práce (deformační/lomová energie) potřebná k úplné propagaci trhliny. Další měřenou veličinou byl čas potřebný pro dosažení maximálního napětí a celkový čas zkoušky. Z kritické hodnoty lomové houževnatosti lze určit sílu, při které dojde k propagaci trhliny. Celkový čas zkoušky slouží k určení doby, kdy dojde k propagaci trhliny na povrch vozovky. Tato hodnota je důležitá pro údržbu komunikace, neboť stanovuje přibližné období, po němž bude třeba vyměnit konstrukční vrstvu.

Zároveň byly porovnávány 2 návrhové přístupy výpočtu napětí při porušení a kritické hodnoty lomové houževnatosti zkušebních půlválcových těles. Byl použit jednak výpočet v souladu s platnou normou ČSN EN 12697-44: 2011 ^[8] a také výpočet dle přechodné normy prEN 12697-44: 2017, která je ve fázi schvalování členskými státy EU. V příloze jsou uvedeny tabulky s výpočtem dle stávající platné normy.

4.5 ZKOUŠKA POJÍŽDĚNÍ KOLEM

Pro provedení zkoušky pojíždění kolem byly vytvořeny odpovídající zkušební vzorky – desky. U těchto desek byly následně změřeny jejich rozměry, byla stanovena maximální objemová hmotnost a následně byla provedena zkouška pojíždění kolem. Při této zkoušce byly desky vloženy do zkušebního zařízení a následně temperovány po dobu cca 2,5 hodin, aby byla dosažena zkušební teplota 50 °C. Poté začala samotná zkouška. Při ní jsou vždy 2 zkušební desky umístěny vedle sebe ve zkušebním zařízení a po dobu několika hodin pojížděny v pravidelných intervalech a při definované délce pohybu celkem 10 000 pojezdy. Tento postup je v souladu s normou ČSN EN 12697-22+A1.^[6] Nejdůležitější ukazatele jsou hodnoty poměrné hloubky vyjeté koleje na vzduchu v % (PRD_{AIR}) a přírůstek hloubky vyjeté koleje v mm/1000 zatěžovacích cyklů (WTS_{AIR}). Tyto a další údaje jsou zaznamenávány pomocí senzorů a pomocí počítače ukládány v elektronické podobě. Podrobné výsledky zaznamenané do protokolů těchto zkoušek jsou součástí příloh.

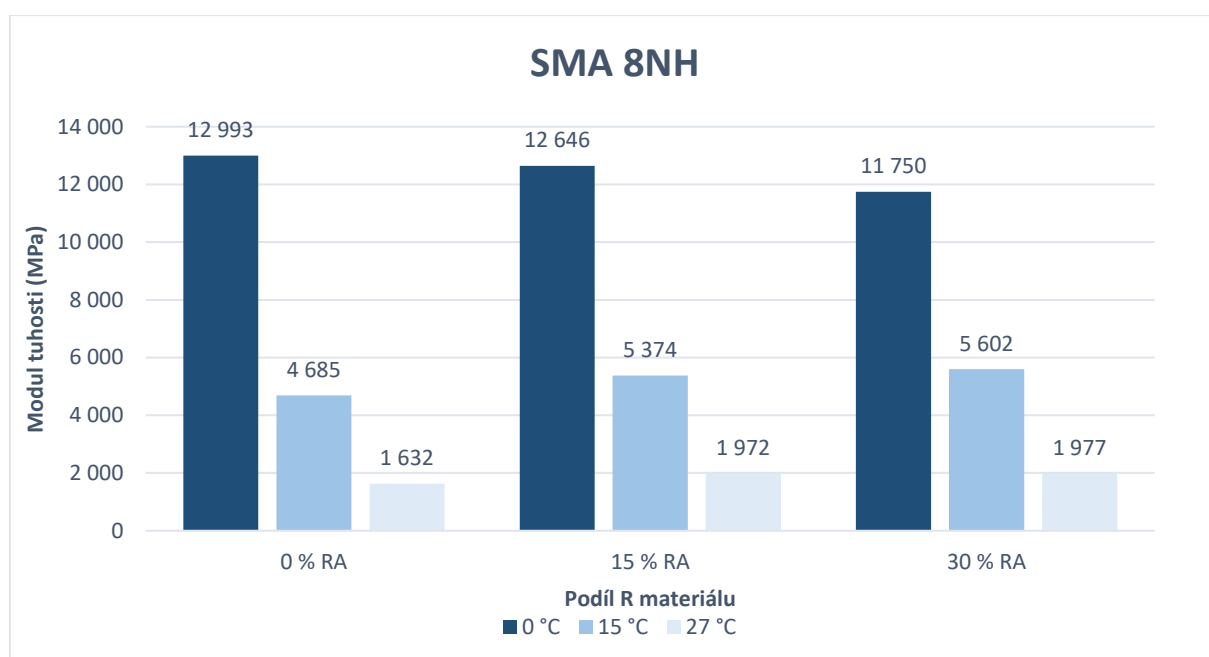
5 VÝSLEDKY LABORATORNÍCH ZKOUŠEK

5.1 MODULY TUHOSTI – NEZESTÁRNUTÁ ZKUŠEBNÍ TĚLESA

Níže uvedené sloupkové grafy ukazují změny a trendy v hodnotách modulu tuhosti u nezestárnutých zkušebních těles. V grafech jsou barevně odlišeny výsledky při různých zkušebních teplotách.

5.1.1 ASFALTOVÁ SMĚS SMA 8NH

U této směsi došlo k nárůstu modulu tuhosti při teplotách 15 °C a 27 °C, a to přibližně o 20 %. Naopak při teplotě 0 °C došlo k poklesu hodnoty modulu tuhosti o cca 10 %.



Graf 5: Závislost modulu tuhosti na množství R materiálu a teplotě prostředí u jednotlivých variant asfaltové směsi SMA 8NH

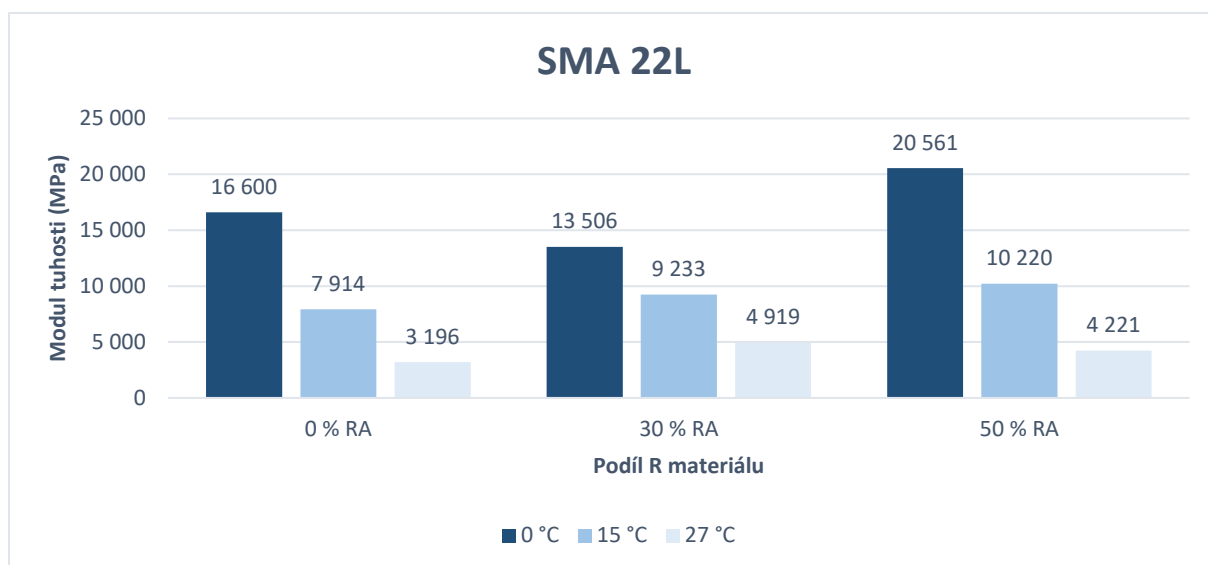
Níže uvedená tabulka uvádí hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty této asfaltové směsi. Je patrné, že hodnota teplotní citlivosti se s příměsí R-materiálu postupně snižuje.

Varianta	Teplotní citlivost
0 % RA	7,96
15 % RA	6,41
30 % RA	5,94

Tab. 4: Hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty asfaltové směsi SMA 8NH

5.1.2 ASFALTOVÁ SMĚS SMA 22L

U této směsi je vidět nárůst modulu tuhosti spolu s rostoucím podílem recyklovaného kameniva. Tento nárůst je patrný při všech zkušebních teplotách. Jedinou výjimku tvoří varianta směsi SMA 22L 30 při teplotě 0 °C, kde došlo oproti směsi bez recyklovaného kameniva k poklesu hodnoty modulu tuhosti. Nicméně u varianty směsi SMA 22L 50 je vidět nárůst hodnot modulu tuhosti, v průměru o téměř 30 %.



Graf 6: Závislost modulu tuhosti na množství R materiálu a teplotě prostředí u jednotlivých variant asfaltové směsi SMA 22L

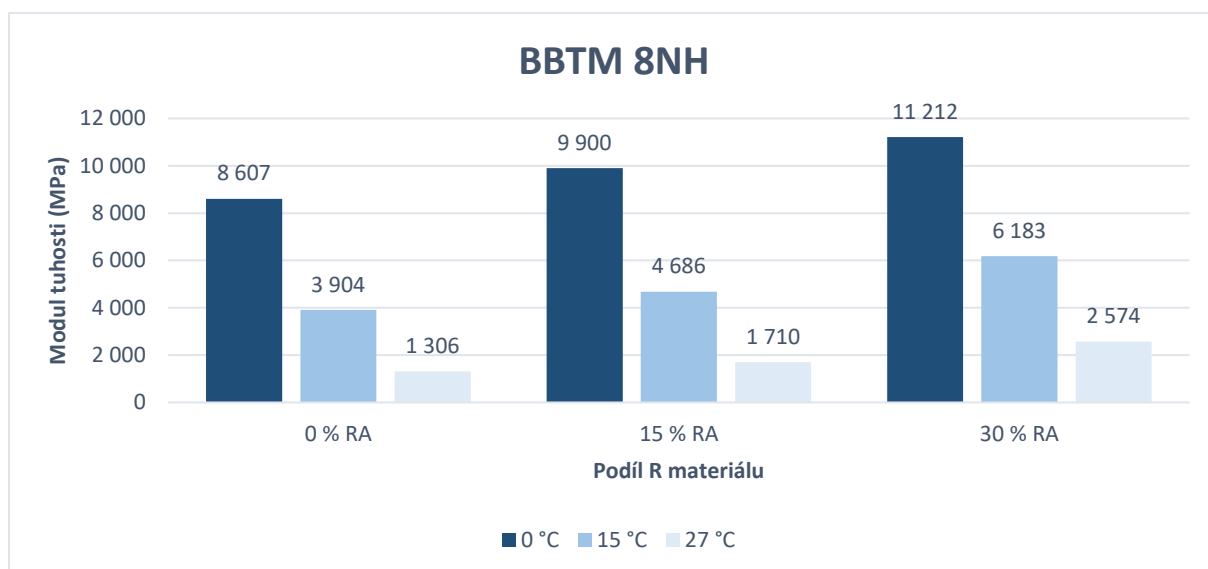
Níže uvedená tabulka uvádí hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty této asfaltové směsi. Je patrné, že hodnota teplotní citlivosti se s příměsí R-materiálu snižuje, přičemž zjištěný trend není zcela logický. Extrémně malé teplotní citlivosti dosahuje varianta asfaltové směsi s 30 % R-materiálu.

Varianta	Teplotní citlivost
0 % RA	5,19
30 % RA	2,75
50 % RA	4,87

Tab. 5: Hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty asfaltové směsi SMA 22L

5.1.3 ASFALTOVÁ SMĚS BBTM 8NH

Zde je patrná přímá závislost mezi množstvím recyklovaného kameniva a nárůstem hodnoty modulu tuhosti. U této směsi bylo také dosaženo nejvyššího relativního nárůstu modulu tuhosti. U varianty BBTM 8NH s 30 % R-materiálu byla při teplotě 27 °C naměřena téměř dvojnásobná hodnota modulu tuhosti, porovnáme-li variantu bez R-materiálu s variantou, kde je R-materiálu ve směsi nejvíce. Poměrný nárůst modulu tuhosti při teplotě 0 °C mezi variantou asfaltové směsi bez R-materiálu a s nejvyšším dávkovaným množstvím R-materiálu je 30,3 %. V případě teploty 27 °C tento poměrový nárůst dosahuje 97,1 %.



Graf 7: Závislost modulu tuhosti na množství R materiálu a teplotě prostředí u jednotlivých variant asfaltové směsi BBTM 8NH

Níže uvedená tabulka uvádí hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty této asfaltové směsi. Je patrné, že hodnota teplotní citlivosti se s příměsí R-materiálu postupně snižuje, podobně jako u asfaltové směsi SMA 8NH. V porovnání se směsí SMA 8NH dosahuje směs BBTM 8NH mírně lepších hodnot.

Varianta	Teplotní citlivost
0 % RA	6,59
15 % RA	5,79
30 % RA	4,36

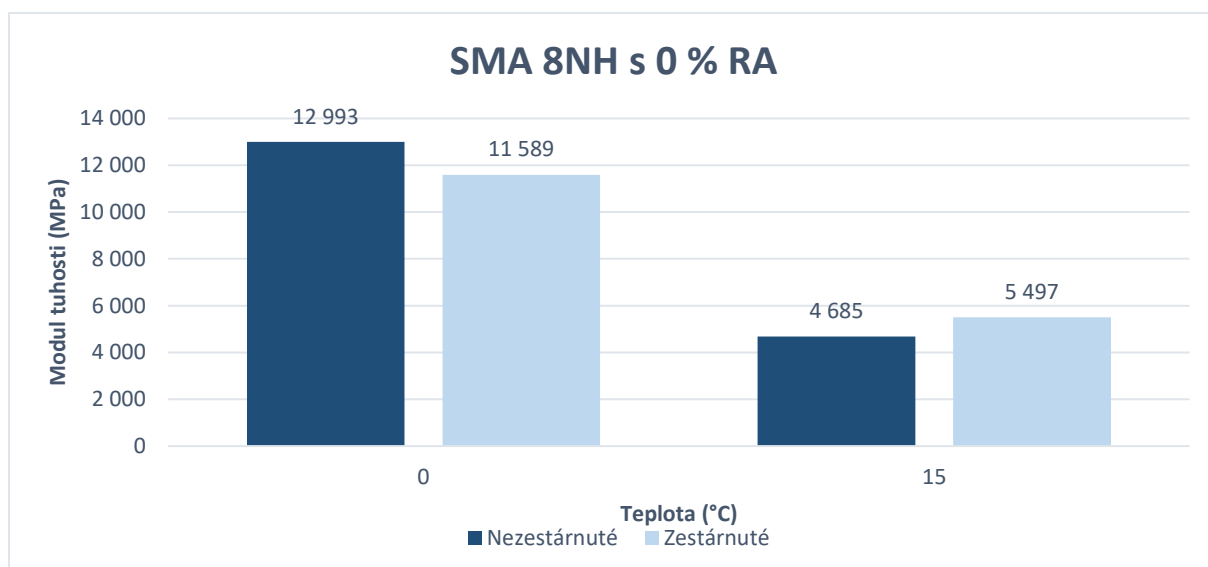
Tab. 6: Hodnoty teplotní citlivosti pro jednotlivé varianty asfaltové směsi BBTM 8NH

5.2 MODULY TUHOSTI – ZKUŠEBNÍ TĚLESA PO LABORATORNÍM STÁRNUTÍ

Níže uvedené sloupcové grafy ukazují srovnání hodnot modulů tuhosti u jednotlivých směsí před stárnutím a po stárnutí. Směsi jsou uvedeny postupně dle podílu R-materiálu v asfaltové směsi. V grafech jsou dále rozlišeny hodnoty modulů tuhosti dle teploty, při níž byla zkouška prováděna a barevně jsou odlišeny výsledky vzorků před procesem stárnutí a po simulaci procesu stárnutí.

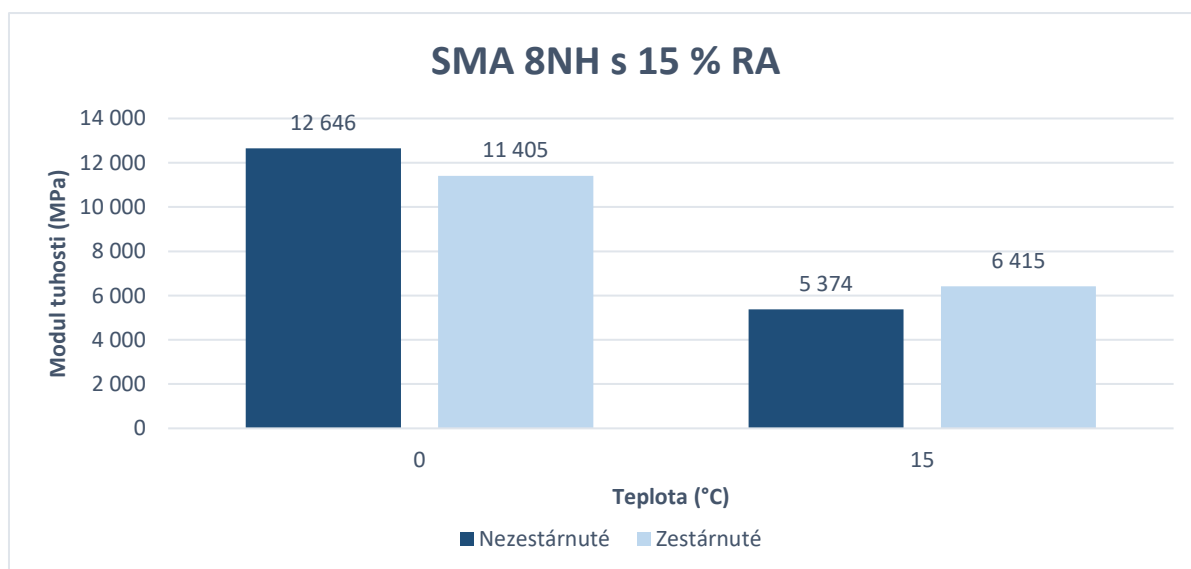
5.2.1 Asfaltová směs SMA 8NH

V případě základní varianty s 0 % R-materiálu byly porovnány hodnoty modulu tuhosti pro obě zvolené zkušební teploty. Při teplotě 15 °C bylo dosaženo u zestárnutých zkušebních těles nárůstu modulu tuhosti o cca 17 %. Naopak při teplotě 0 °C došlo k 11 % poklesu. Tato skutečnost indikuje dle konzultací opakovaně dosahovanou zlepšenou teplotní citlivost asfaltové směsi po jejím stárnutí, jak je v posledních letech na Fakultě stavební ČVUT v Praze potvrzováno.



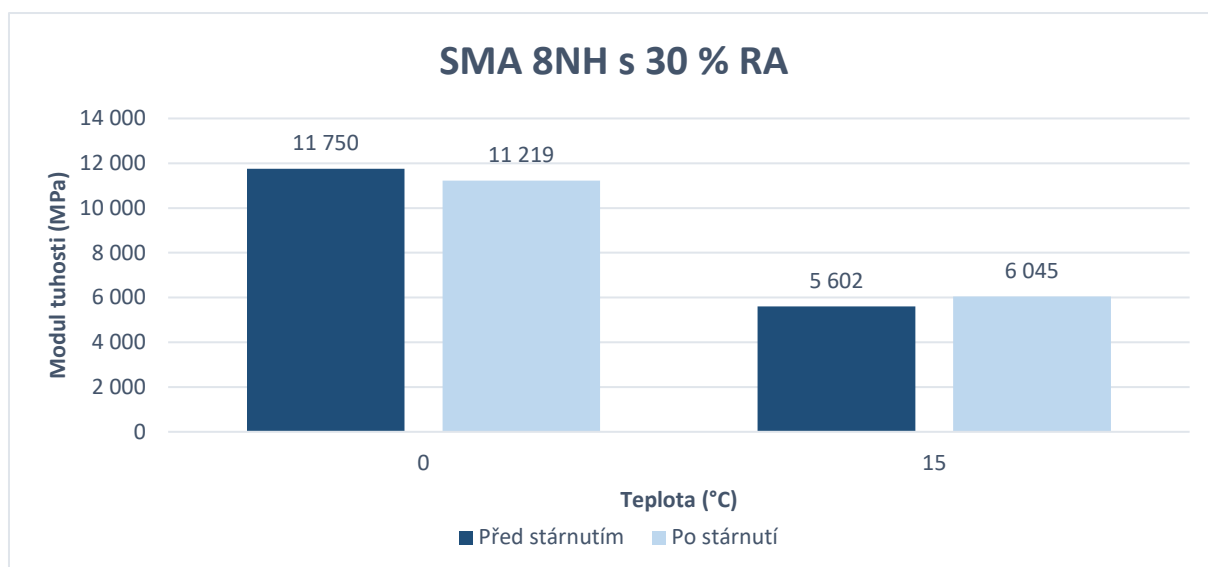
Graf 8: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 8NH bez příměsi recyklovaného kameniva

U varianty SMA 8NH s 15 % R-materiálu lze pozorovat obdobný trend, jako u varianty bez recyklovaného kameniva. Při teplotě 15 °C došlo u zestárnutých zkušebních těles k 19 % nárůstu modulu tuhosti, a naopak při teplotě 0 °C tato hodnota poklesla o přibližně 10 %. Zjištěné změny modulu tuhosti jsou tak velmi podobné.



Graf 9: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 8NH s 15 % příměsí recyklovaného kameniva

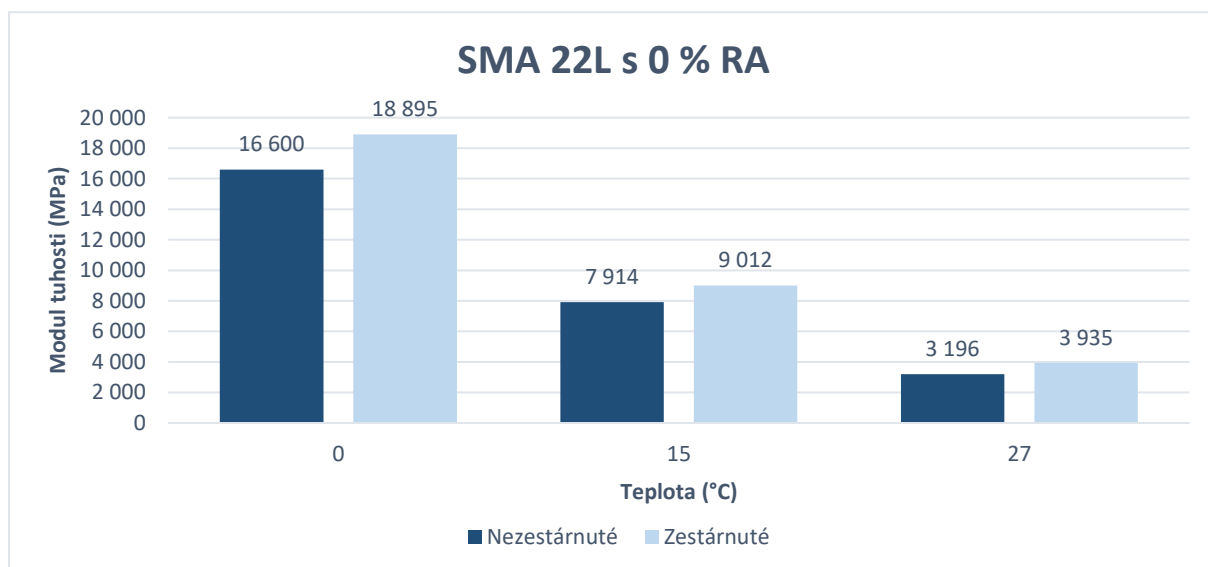
Varianta SMA 8NH s 30 % R-materiálu potvrdila předchozí trend v změnách hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých vzorků. Při teplotě 15 °C vzrostla hodnota modulu tuhosti o přibližně 14 %. Nicméně pokles hodnoty modulu tuhosti při teplotě 0 °C nebyl tak markantní, jako v předchozích případech a dosáhl pouze necelých 5 %. Je otázkou, zda je to zapříčiněno přítomností R-materiálu nebo zda jsou důvodem jiné okolnosti.



Graf 10: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 8NH s 30 % příměsí recyklovaného kameniva

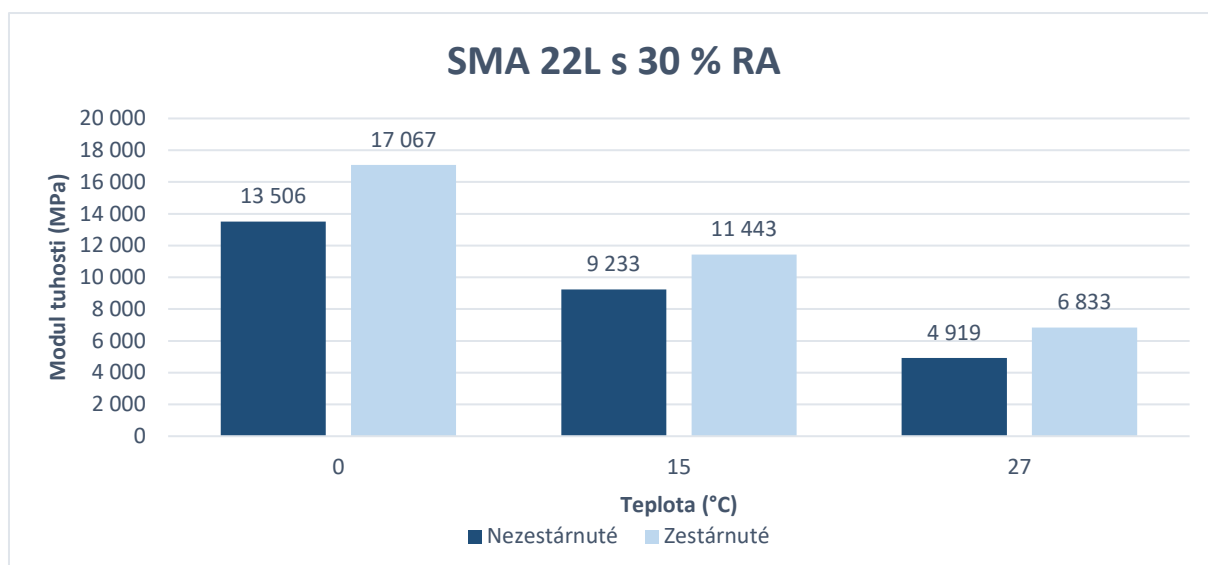
5.2.2 Asfaltová směs SMA 22L

U základní varianty bez R-materiálu byl při všech zkušebních teplotách zaznamenán nárůst hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých vzorků. Nejvýraznější byl tento nárůst při teplotě 27 °C, kde dosáhl 23 %. U ostatních teplot byl nárůst přibližně 14 %. Vyšší nárůst tuhosti po simulovaném stárnutí při volbě vyšší zkušební teploty je jev, který je na FSv ČVUT v Praze pozorován zpravidla u každé směsi, kde se provádí stanovení modulu tuhosti v intervalu 0 - 27 °C. Nárůst při teplotě 15 °C potom velmi dobře odpovídá poznatkům, které již byly zjištěny u asfaltové směsi SMA 8 NH.



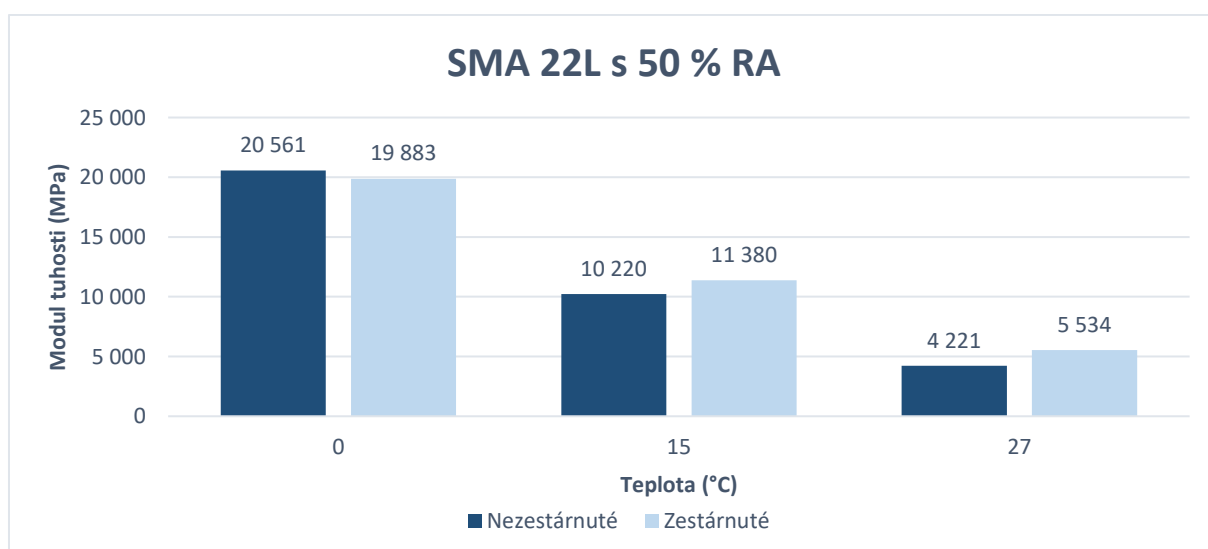
Graf 11: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 22L bez příměsí recyklovaného kameniva

U varianty SMA 22L s 30 % R-materiálu se projevil stejný trend, jako v předchozím případě. Při všech teplotách došlo ke zvýšení hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých vzorků. Nejvyššího nárůstu bylo znovu dosaženo při teplotě 27 °C, kde tento nárůst činil téměř 39 %. U ostatních teplot byl nárůst v porovnání s předešlou variantou směsi SMA 22 L o poznání vyšší a dosáhl přibližně 25 %.



Graf 12: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 22L s 30 % příměsí recyklovaného kameniva

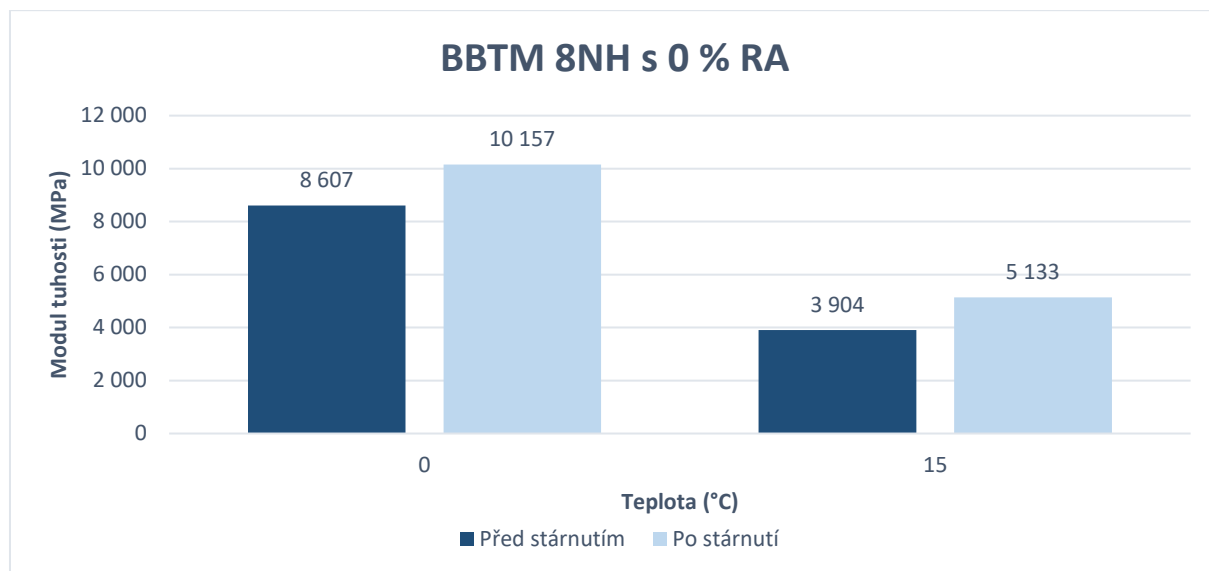
U varianty SMA 22L s 50 % R-materiálu došlo k určité odchylce od stávajícího trendu, když při teplotě 0 °C byl u zestárnutých vzorků zaznamenán přibližně 3 % pokles hodnoty modulu tuhosti. Jelikož však změny při této nízké teplotě jsou zpravidla poměrně malé, nelze zjištěný výsledek považovat za nikterak zásadní odchylku, a to i s ohledem k přípustným rozptylům výsledků měření, které jsou pro jednotlivá zkušební tělesa v jedné sadě měření přípustné. Měření při ostatních teplotách již odpovídala trendu, jak byl prezentován u předešlých variant této asfaltové směsi. Nejvyšší nárůst hodnoty modulu tuhosti byl při teplotě 27 °C, a to o 31 %. Při teplotě 15 °C tento nárůst dosáhl 11 % a mnohem více se blíží poznatkům získaným u asfaltové směsi SMA 22L bez R-materiálu. Na druhé straně výsledky pro teplotu 27 °C naznačují, že s vyšším podílem R-materiálu v tomto typu směsi se zvyšuje relativní nárůst modulu tuhosti. Jelikož měření byla provedena jen na sérii 3 asfaltových směsí bez jakéhokoli opakování, nelze z výše uvedeného usuzovat na žádný zobecňující závěr, který by popisoval nějaký jednoznačný trend. Lze jen poukázat na možnou závislost, která se na základě výsledků provedených měření jeví jako možná.



Graf 13: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi SMA 22L s 50 % příměsí recyklovaného kameniva

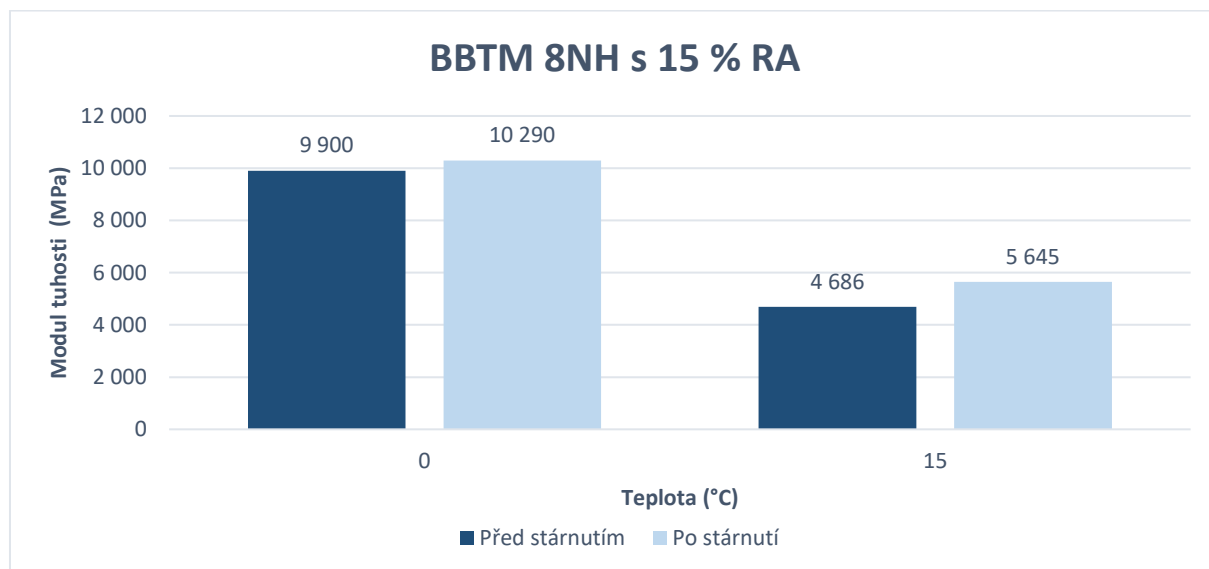
5.2.3 Asfaltová směs BBTM 8NH

U základní varianty BBTM 8NH bez R-materiálu byl při obou sledovaných teplotách naměřen nárůst hodnoty modulu tuhosti. Tento nárůst činil 18 % při teplotě 0 °C a více jak 31 % při zkušební teplotě 15 °C. Asfaltová směs BBTM 8NH se tedy v porovnání se směsí SMA 8NH chovala odlišně. Současně se ukazuje, že je pravděpodobně více citlivá na účinek stárnutí.



Graf 14: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi BBTM 8NH bez příměsí recyklovaného kameniva

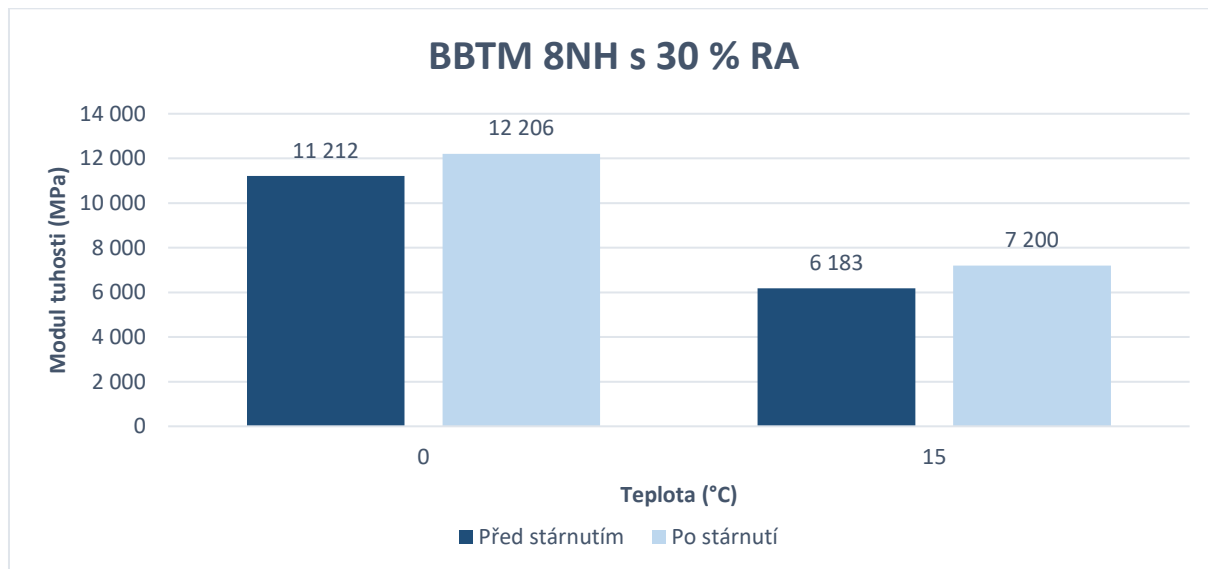
U varianty směsi s 15 % R-materiálu se projevil stejný trend, jako v předchozím případě. Při teplotě 0 °C byl nárůst méně výrazný a dosáhl necelých 4 %. Při teplotě 15 °C došlo k nárůstu hodnoty modulu tuhosti o více jak 20 %.



Graf 15: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi BBTM 8NH s 15 % příměsí recyklovaného kameniva

Varianta BBTM 8NH s 30 % R-materiálu má stejný trend, jaký byl pozorován v předchozích dvou případech. Při obou teplotách došlo u zestárnutých zkušebních těles k nárůstu hodnoty modulu tuhosti, ale méně výraznému. Při teplotě 0 °C byl nárůst necelých 9 %, při teplotě 15 °C dosáhl nárůst

více jak 16 %. Zaměříme-li se na vývoj relativního nárůstu tuhosti při teplotě 15 °C, lze opět s velkou opatrností tvrdit, že vlivem použití asfaltového R-materiálu se asfaltová směs stává méně citlivá na účinek stárnutí, a proto i změna tuhosti po laboratorním simulovaném stárnutí je nižší.



Graf 16: Závislost modulu tuhosti na zkušební teplotě a podrobení těles procesu stárnutí u varianty asfaltové směsi BBTM 8NH s 30 % příměsí recyklovaného kameniva

5.3 PEVNOST V PŘÍČNÉM TAHU A MODUL PRUŽNOSTI

Níže uvedené tabulky uvádí výsledky měření modulu pružnosti a pevnosti v příčném tahu a celkového stanovení odolnosti proti účinkům vody (trvanlivosti) u jednotlivých směsí a jejich variant dle podílu aplikovaného R-materiálu. Je zde proto samostatně uvedena i hodnota ITSR, tedy poměr jednotlivých hodnot pevnosti v příčném tahu v závislosti na podmínkách, při nichž byla tělesa zatěžována a kterým byla před vlastním zatěžováním vystavena. Rovněž je uveden poměr hodnot modulů pružnosti těles zkoušených za sucha a těles vystavených působení vody jako alternativní poměrový ukazatel pro účinek působící vody nebo vody a mrazu na zkušební těleso.

5.3.1 Asfaltová směs SMA 8NH

U varianty SMA 8NH s 15 % R-materiálu se hodnota pevnosti v příčném tahu s použitím recyklovaného kameniva takřka nezměnila. U varianty SMA 8NH s 30 % R-materiálu došlo k nárůstu pevnosti v příčném tahu u těles zkoušených za sucha a těles vystavených působení mrazu o přibližně 10 %. U modulu pružnosti došlo s použitím recyklovaného kameniva k markantnímu nárůstu, u varianty SMA 8NH s 30 % R-materiálu k více než dvojnásobnému. Je třeba dále doplnit, že všechny posuzované varianty této směsi splňují mezní požadavek TP 259, přičemž současně je pro základní ukazatel ITSR patrné, že v důsledku přítomnosti R-materiálu v asfaltové směsi dochází s jeho rostoucím množstvím k zhoršování vodní citlivosti.

SMA 8NH	Pevnost v příčném tahu			Modul pružnosti			ITSR [-]	ITSR_f [-]	Poměr modulů pružnosti [-]
	R _{dry}	R _{wet}	R _{w+f}	E _{dry}	E _{wet}	E _{w+f}			
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			
0 % RA	1,41	1,25	1,21	23,06	18,09	15,39	0,89	0,86	0,78
15 % RA	1,43	1,23	1,19	40,51	36,76	23,00	0,86	0,83	0,91
30 % RA	1,53	1,23	1,35	57,07	38,81	35,17	0,80	0,88	0,68

Tab. 7: Hodnoty pevností v příčném tahu, modulu pružnosti, hodnota ITSR a poměr modulů pružnosti za sucha a za vlhka u variant asfaltové směsi SMA 8NH

5.3.2 Asfaltová směs SMA 22L

U této směsi byl zaznamenán poměrně výrazný pokles pevnosti v tahu u varianty SMA 22L s 30 % R-materiálu v případě ukazatele ITSR stanoveného s využitím modifikovaného postupu dle americké organizace AASHTO. V případě základního ukazatele ITSR s rostoucím podílem R-materiálu asfaltová směs vykazuje též postupné zhoršení vodní citlivosti, to však není tak výrazné jako v případě výše zmíněného případu. Zjištěný pokles pro základní charakteristiku ITSR dobře koresponduje s poznatkem zjištěným u variant asfaltové směsi SMA 8 NH. Rovněž hodnoty modulu pružnosti se s použitím recyklovaného kameniva při působení vody a mrazu snížily. U vzorků zkoušených za sucha se hodnota modulu pružnosti téměř nezměnila nebo se naopak mírně zvýšila. U varianty SMA 22L s 50 % R-materiálu došlo rovněž k poklesu hodnot modulu pružnosti a pevnosti v příčném tahu u těles vystavených působení vody a mrazu. V případě těchto výsledků lze konstatovat, že při zvyšování podílu asfaltového R-materiálu ve směsi by u tohoto typu asfaltové směsi bylo nutné zvolit vhodný typ přílnavostní přísady, která by měla odolnost asfaltové směsi proti účinkům vody při rostoucím podílu R-materiálu zlepšit.

SMA 22L	Pevnost v příčném tahu			Modul pružnosti			ITSR [-]	ITSR_f [-]	Poměr modulů pružnosti [-]
	R _{dry}	R _{wet}	R _{w+f}	E _{dry}	E _{wet}	E _{w+f}			
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			
0 % RA	1,84	1,58	1,34	27,01	47,09	40,11	0,86	0,73	1,74
30 % RA	1,48	1,14	0,86	42,77	35,40	32,74	0,77	0,58	0,83
50 % RA	2,04	1,50	1,44	26,18	42,11	30,74	0,73	0,71	1,61

Tab. 8: Hodnoty pevností v příčném tahu, modulu pružnosti, hodnota ITSR a poměr modulů pružnosti za sucha a za vlhka u variant asfaltové směsi SMA 22L

5.3.3 Asfaltová směs BBTM 8NH

S použitím recyklovaného kameniva se u této směsi rapidně zvýšil modul pružnosti, a to na více jak trojnásobek původní hodnoty u varianty směsi BBTM 8NH s 30 % R-materiálu u těles zkoušených za sucha. Také tělesa vystavená působení vody vykazovala výrazný nárůst modulu pružnosti. Ten činil dvoj- až téměř trojnásobek oproti variantě bez recyklovaného kameniva. Hodnoty pevností v příčném tahu se nejvíce zvýšily u varianty směsi BBTM 8NH s 30 % R-materiálu. Zde byl nárůst až 77 % v porovnání s výchozí variantou bez použití asfaltového R-materiálu. U těles vystavených pouze působení vody, nebo zkoušených za sucha byl nárůst pevnosti v příčném tahu přibližně 30 %. Naopak u varianty BBTM 8NH s 15 % R-materiálu došlo u pevnosti v příčném tahu k poklesu nebo se hodnoty téměř nezměnily (u vzorků vystavených působení vody a mrazu). Hodnoty zjištěné pro tuto variantu – zejména z pohledu charakteristiky ITSR – se jeví jako nelogické a nezapadající do trendu. Toto tvrzení lze učinit i s ohledem k předešlým dvěma posuzovaným typům asfaltové směsi, přičemž lze očekávat,

že chování směsi BBTM 8 NH by se mělo do značné míry podobat chování směsi SMA 8 NH, což se plně nepotvrdilo a asfaltová směs typu BBTM 8NH vykazuje v průměru horší výsledek.

BBTM 8NH	Pevnost v příčném tahu			Modul pružnosti			ITSR [-]	ITSR_f [-]	Poměr modulů pružnosti [-]
	R _{dry}	R _{wet}	R _{w+f}	E _{dry}	E _{wet}	E _{w+f}			
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]			
0 % RA	1,09	0,86	0,62	18,41	14,42	11,91	0,79	0,57	0,78
15 % RA	0,57	0,68	0,66	34,68	23,35	30,51	1,19	1,16	0,67
30 % RA	1,42	1,14	1,10	56,38	39,83	31,53	0,80	0,77	0,71

Tab. 9: Hodnoty pevností v příčném tahu, modulu pružnosti, hodnota ITSR a poměr modulů pružnosti za sucha a za vlhka u variant asfaltové směsi BBTM 8NH

5.4 VÝSLEDKY MĚŘENÍ TRHLIN

V níže uvedených tabulkách je uvedeno srovnání jednotlivých směsí dle lomové houževnatosti a množství energie potřebné k propagaci trhliny ve zkušebním půlválcovém tělese. Zároveň jsou tělesa rozdělena na nezestárnutá (virgin) a zestárnutá (aged). U směsi SMA 22L jsou uvedeny také hodnoty u těles zkoušených z hlediska únavové trhliny (fatigue). Zkoušky na únavové trhliny byly prováděny při teplotě 15 °C, všechny ostatní zkoušky na půlválcových zkušebních tělesech byly prováděny při teplotě 0 °C. Zkušební rychlost zatěžování pro posuzování teplotně indukované trhliny (2,5 mm/min) byla odlišná od normou doporučené rychlosti (5,0 mm/min). Teplota pro únavovou trhlínu byla identická. Odlišná zatěžovací rychlost, která je volena na FSv ČVUT v Praze, vychází z dlouhodobého výzkumu, který katedra silničních staveb provádí. Jelikož dle amerických poznatků se pro únavovou trhlínu zpravidla volí zatěžovací rychlost 1,0 mm/min, bylo cílem na výzkumů ČVUT v Praze sjednotit obě rychlosti, a to i s ohledem k možnosti sledovat trend chování charakteristik zkoušky při změně zkušební teploty (0 °C a 15 °C). Takové porovnání trendu by při rozdílné zatěžovací rychlosti nebylo možné. Druhou skutečností volby „kompromisní“ zatěžovací rychlosti 2,5 mm/min je kvalita dat pořízeného záznamu použitým dataloggerem. Při vyšší – normou doporučené – zatěžovací rychlosti se zpravidla podařilo získat menší soubor jednotlivých zaznamenaných okamžiků průběhu měření. Tato skutečnost má samozřejmě vliv na znázornění průběhu závislosti působící síly a vyvolaného přetvoření.

V příloze jsou pak dále uvedeny grafy zachycující průběh zatěžovací zkoušky, včetně části odtižení, pro jednotlivá půlválcová zkušební tělesa.

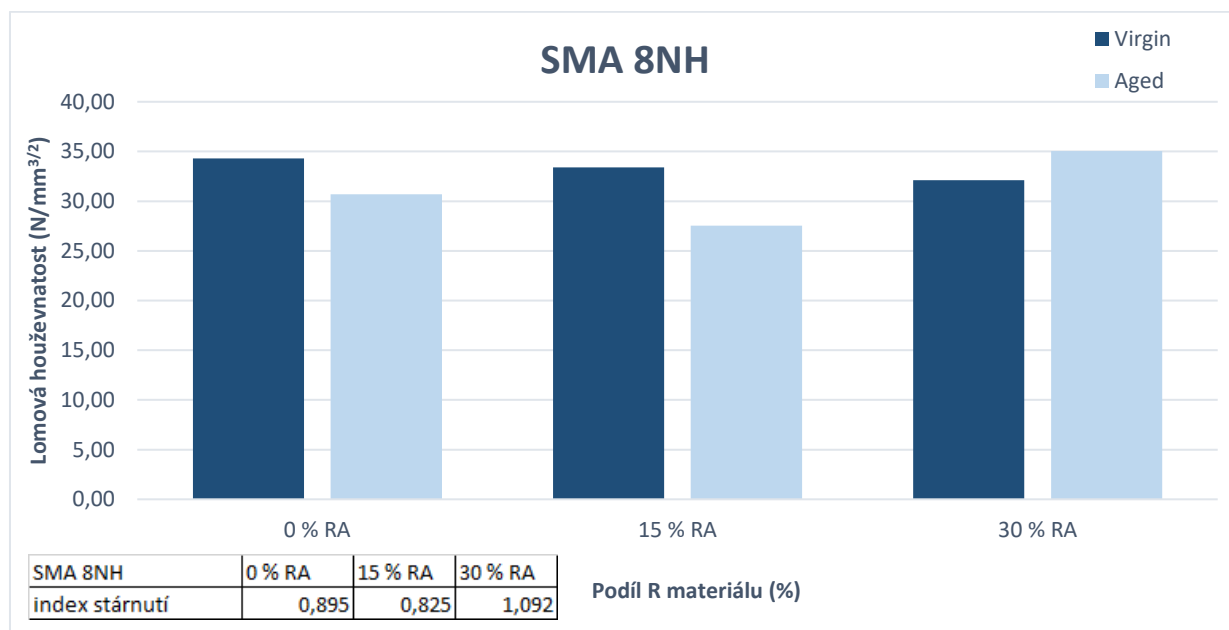
5.4.1 Asfaltová směs SMA 8NH

V tabulce jsou uvedeny základní charakteristiky variant směsi změřené při zkoušení půlválcových zkušebních těles (tělesa před stárnutím a po stárnutí). Hodnota lomové energie a celkového času zkoušky se u variant s příměsí recyklovaného kameniva postupně snižuje, přičemž pokles je výraznější u nezestárnutých těles. Rovněž index stárnutí je spíše menší než 1,0. Nižší lomová houževnatost souvisí s nárůstem hodnoty modulu tuhosti, tedy výsledek indikuje, že těleso se stává křehčím. Nicméně u zestárnutých těles varianty SMA 8NH s 30 % R-materiálu se hodnoty sledovaných veličin téměř nezměnily. U této varianty se také projevila nejmenší náchylnost k degradaci vlivem stárnutí.

SMA 8NH		Čas dosažení maxima [s]	Čas konce [s]	Lomová energie do max. F [J]	Lomová energie celková [J]	Napětí při porušení [MPa]	Lomová houževnatost [N/mm ^{3/2}]	Index stárnutí – houževnatost [-]
0 % RA	virgin	20	42	1,9	3,4	4,63	34,29	0,895
	aged	14	39	1,6	3,2	4,13	30,68	
15 % RA	virgin	13	25	1,8	2,5	4,51	33,39	0,825
	aged	16	36	1,4	2,8	3,70	27,53	
30 % RA	virgin	18	34	1,8	3,0	4,31	32,10	1,092
	aged	19	35	2,0	3,3	4,71	35,05	

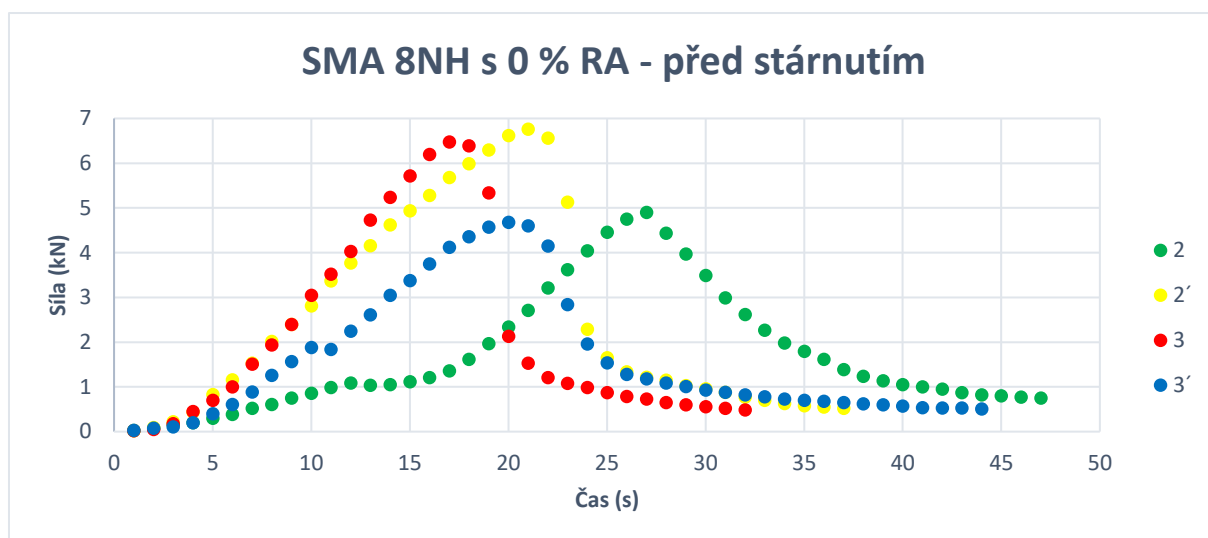
Tab. 10: Hodnoty času dosažení max. F, celkového času zkoušky, lomové energie do max. F, celkové lomové energie, napětí při porušení, lomové houževnatosti a indexu stárnutí u variant asfaltové směsi SMA 8NH

Následující graf ukazuje srovnání hodnot lomové houževnatosti u nezestárnutých a zestárnutých půlválcových zkušebních těles, v závislosti na množství recyklovaného kameniva. Rovněž je uvedena hodnota indexu stárnutí. Zkušební teplota byla 0 °C.

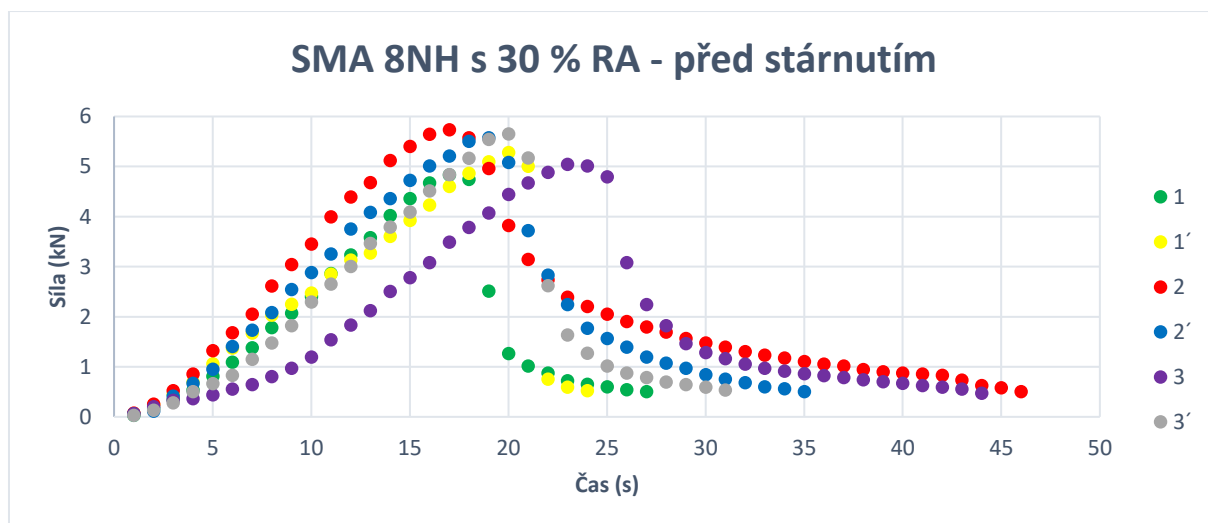


Graf 17: Hodnoty lomové houževnatosti a indexu stárnutí těles před stárnutím a po stárnutí u variant asfaltové směsi SMA 8NH

Níže uvedené grafy uvádějí porovnání pracovních diagramů zatěžování jednotlivých půlválcových zkušebních těles. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze vzorky před laboratorním stárnutím. Je vidět pozvolný pokles síly potřebné pro iniciaci trhliny, přičemž čas nutný k dosažení tohoto stavu zůstává prakticky neměnný. Zkušební teplota byla 0 °C. Pro doplnění uvádím, že varianta s 15 % R-materiálu zde není prezentována, protože pro tuto jedinou sadu zkušebních těles se nepodařilo zaznamenat průběh zkoušky na datalogger. Proto nemohou být pracovní diagramy znázorněny.



Graf 18: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty SMA 8NH s 0 % R-materiálu



Graf 19: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty SMA 8NH s 30 % R-materiálu

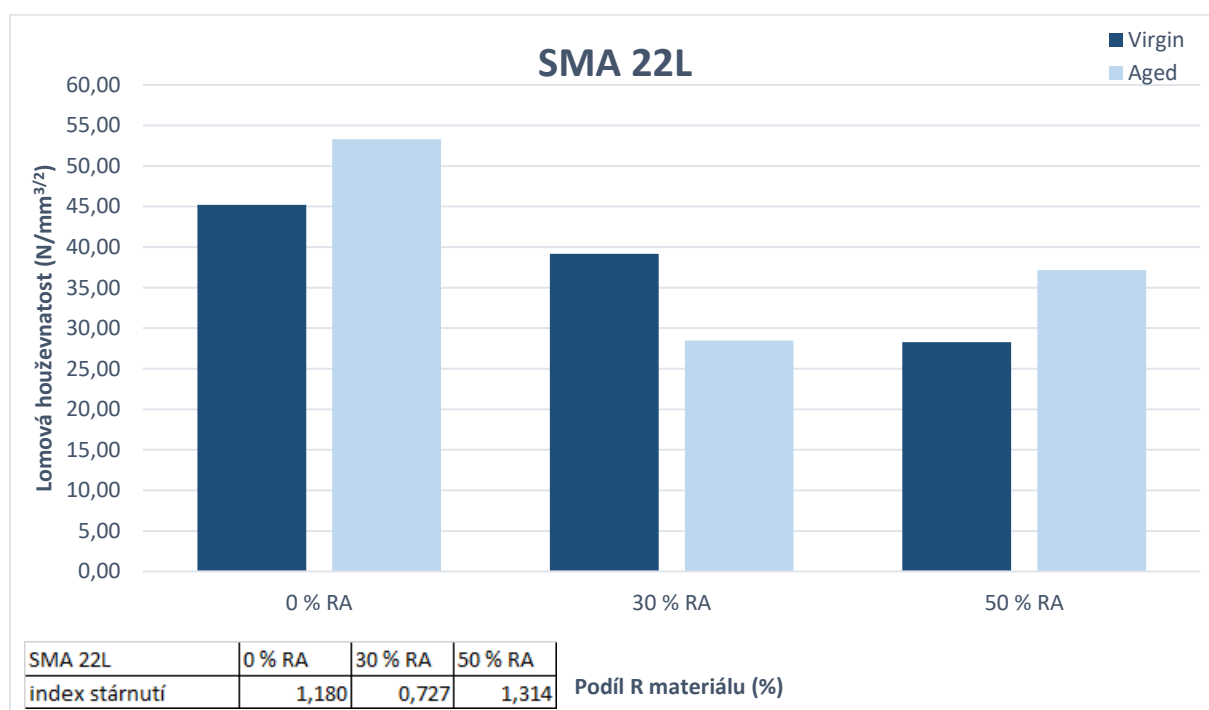
5.4.2 Asfaltová směs SMA 22L

V tabulce jsou uvedeny základní charakteristiky variant směsi změřené při zkoušení půlválcových zkušebních těles (tělesa před stárnutím a po stárnutí). Hodnota lomové energie a celkového času zkoušky se u variant s příměsí recyklovaného kameniva postupně snižuje, přičemž pokles je výraznější u zestárnutých těles. Hodnoty indexu stárnutí se pohybují v rozmezí 0,73 až 1,31, přičemž větší rozptyl hodnot je u variant s příměsí recyklovaného kameniva. Větší náchylnost k tvorbě trhlin rovněž odpovídá zvýšenému modulu tuhosti u těles s příměsí R-materiálu.

SMA 22L		Čas dosažení maxima [s]	Čas konce [s]	Lomová energie do max. F [J]	Lomová energie celková [J]	Napětí při porušení [MPa]	Lomová houževnatost [N/mm ^{3/2}]	Index stárnutí – houževnatost [-]
0 % RA	virgin	18	32	2,2	3,1	6,08	45,20	1,180
	aged	20	45	3,4	5,0	7,19	53,32	
30 % RA	virgin	17	30	1,8	2,6	5,28	39,16	0,727
	aged	15	28	1,3	2,0	3,82	28,46	
50 % RA	virgin	18	30	1,3	1,9	3,80	28,28	1,314
	aged	21	37	2,3	3,2	5,01	37,18	

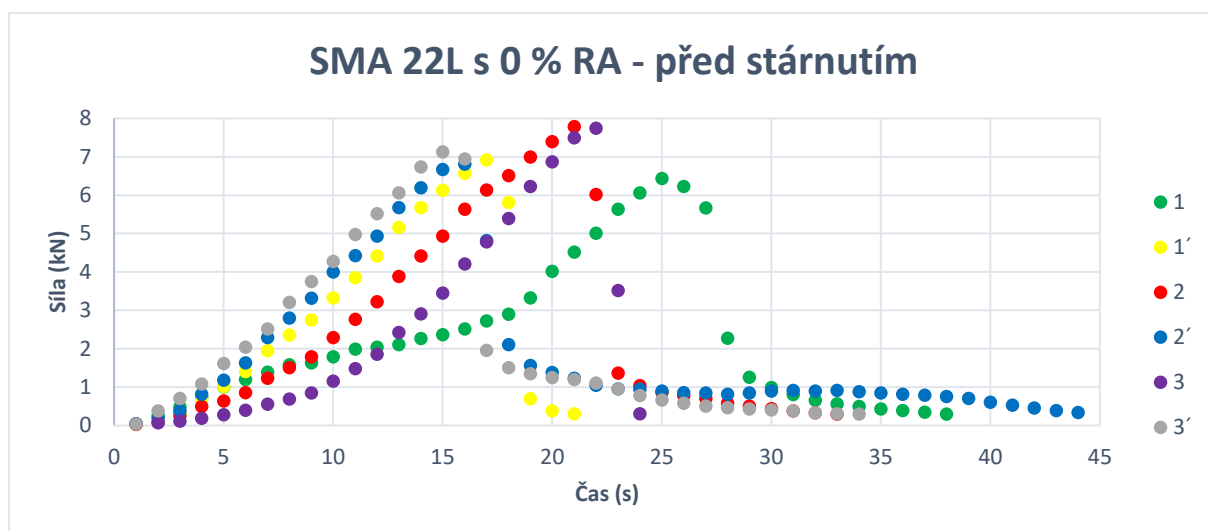
Tab. 11: Hodnoty času dosažení max. F, celkového času zkoušky, lomové energie do max. F, celkové lomové energie, napětí při porušení, lomové houževnatosti a indexu stárnutí u variant asfaltové směsi SMA 22L

Následující graf ukazuje srovnání hodnot lomové houževnatosti u nezestárnutých a zestárnutých půlválcových zkušebních těles, v závislosti na množství recyklovaného kameniva. Rovněž je uvedena hodnota indexu stárnutí. Zkušební teplota byla opět 0 °C.

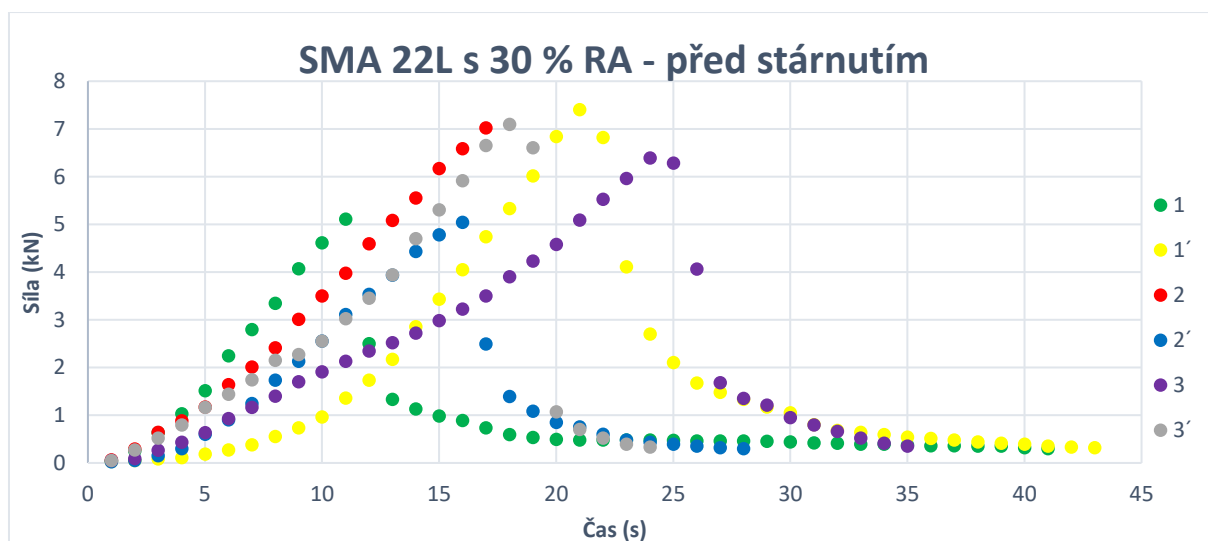


Graf 20: Hodnoty lomové houževnatosti a indexu stárnutí těles před stárnutím a po stárnutí u variant asfaltové směsi SMA 22L

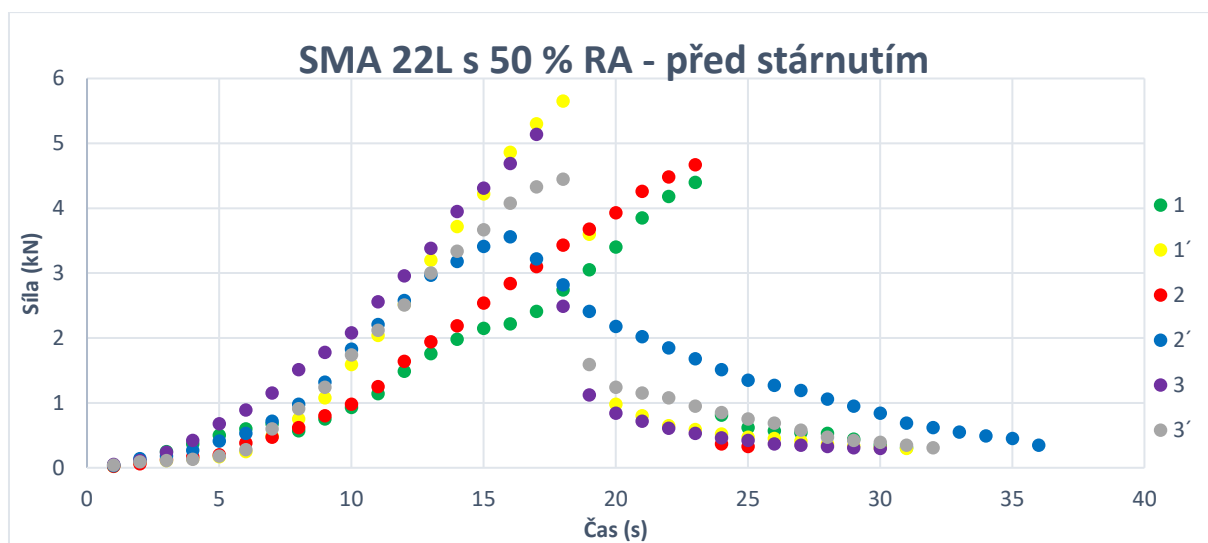
Níže uvedené grafy uvádějí porovnání pracovních diagramů zatěžování jednotlivých půlválcových zkušebních těles. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze vzorky před laboratorním stárnutím. Je vidět pokles síly potřebné pro iniciaci trhliny u varianty s 50 % R-materiálu. U všech těles je zároveň vidět náhlé porušení a rychlý pokles síly po dosažení jejího maxima. Zkušební teplota během zatěžování byla 0 °C.



Graf 21: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty SMA 22L s 0 % R-materiálu



Graf 22: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty SMA 22L s 30 % R-materiálu



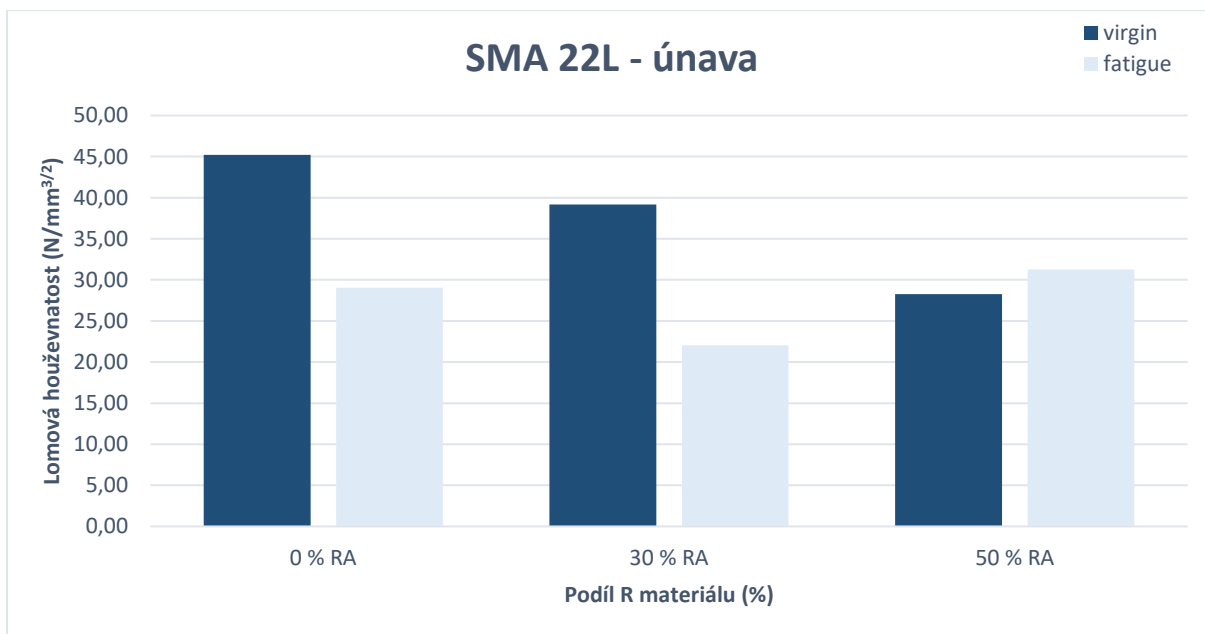
Graf 23: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty SMA 22L s 50 % R-materiálu

U variant asfaltové směsi SMA 22L byla navíc ještě provedena zkouška stanovení tzv. „únavové trhliny“. Tato zkouška byla prováděna při teplotě 15 °C, která více odpovídá oboru teplot, při kterých jsou zpravidla únavové charakteristiky asfaltových směsí stanovovány. Následující tabulka uvádí změny v charakteristikách variant směsi u půlválcových těles zkoušených na únavu v porovnání se zestárnutými tělesy.

SMA 22L		Čas dosažení maxima [s]	Čas konce [s]	Lomová energie do max. F [J]	Lomová energie celková [J]	Napětí při porušení [MPa]	Lomová houževnatost [$\text{N/mm}^{3/2}$]
0 % RA	aged	20	45	3,4	5,0	7,19	53,32
	fatigue	21	98	2,1	5,2	3,88	29,06
30 % RA	aged	15	28	1,3	2,0	3,82	28,46
	fatigue	15	60	1,0	2,0	2,94	22,02
50 % RA	aged	21	37	2,3	3,2	5,01	37,18
	fatigue	21	82	2,3	4,4	4,17	31,25

Tab. 12: Hodnoty času dosažení max. F, celkového času zkoušky, lomové energie do max. F, celkové lomové energie, napětí při porušení, lomové houževnatosti variant asfaltové směsi SMA 22L (zestárnuté vzorky a vzorky na únavu)

V níže uvedeném grafu je srovnání hodnot lomové houževnatosti zkušebních půlválcových těles, která nebyla podrobena procesu stárnutí a těles zkoušených na únavu. Nejmenší náchylnost k degradaci vlivem únavy vykazuje varianta SMA 22L s 50 % R-materiálu. Nejsou sice provedena dostatečná opakování měření a zahrnutí většího počtu různých směsí, nicméně už tento výsledek naznačuje, že vyšší podíl R-materiálu v této asfaltové směsi by mohl mít pozitivní vliv na její únavové chování.



Graf 24: Hodnoty lomové houževnatosti a indexu stárnutí těles před stárnutím a vzorků zkoušených na únavu u variant asfaltové směsi SMA 22L

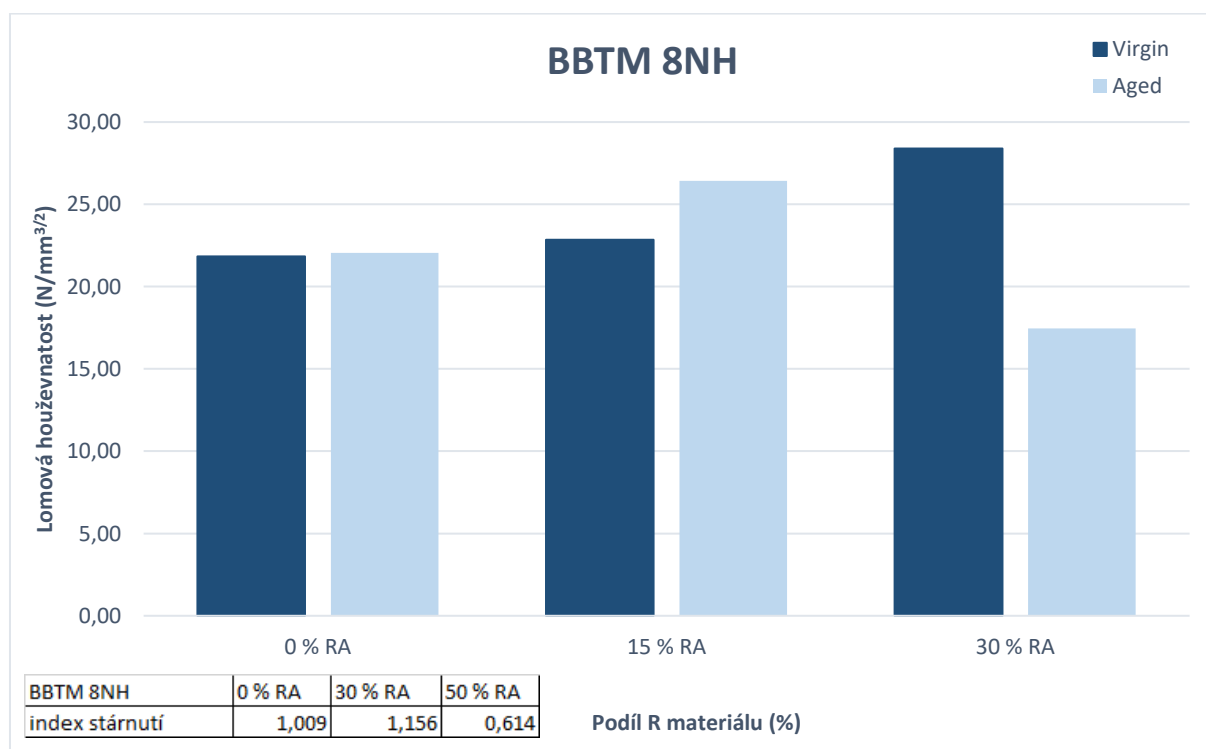
5.4.3 Asfaltová směs BBTM 8NH

V tabulce jsou uvedeny základní charakteristiky variant směsi změřené při zkoušení půlválcových zkušebních těles (tělesa před stárnutím a po stárnutí). Hodnota lomové energie a celkového času zkoušky se u varianty s 15 % R-materiálu mírně zvýšila, ale u varianty s 30 % příměsí došlo u zestárnutých zkušebních těles k výraznému poklesu. Lze tedy opět pozorovat odlišné chování oproti směsi SMA 8NH.

BBTM 8NH		Čas dosažení maxima [s]	Čas konce [s]	Lomová energie do max. F [J]	Lomová energie celková [J]	Napětí při porušení [MPa]	Lomová houževnatost [N/mm ^{3/2}]	Index stárnutí – houževnatost [-]
0 % RA	virgin	14	32	1,1	2,2	2,94	21,84	1,009
	aged	16	27	1,0	1,8	2,97	22,04	
15 % RA	virgin	16	32	1,4	2,3	3,07	22,85	1,156
	aged	17	28	1,5	2,3	3,55	26,42	
30 % RA	virgin	15	23	1,4	2,1	3,82	28,40	0,614
	aged	19	30	1,7	2,5	2,35	17,45	

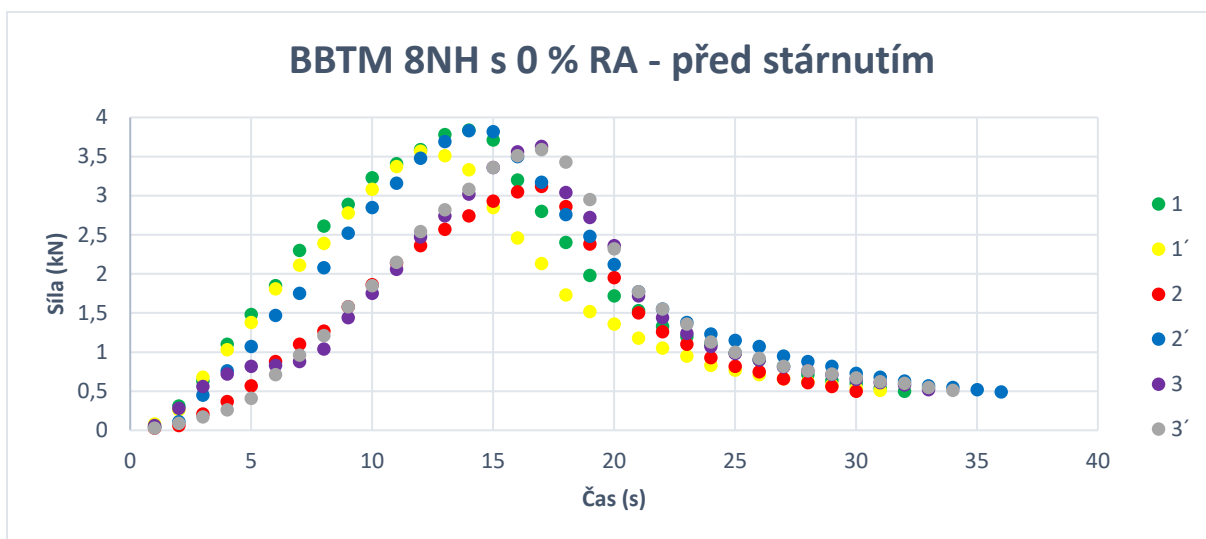
Tab. 13: Hodnoty času dosažení max. F, celkového času zkoušky, lomové energie do max. F, celkové lomové energie, napětí při porušení, lomové houževnatosti a indexu stárnutí u variant asfaltové směsi BBTM 8NH

Následující graf ukazuje srovnání hodnot lomové houževnatosti u nezestárnutých a zestárnutých zkušebních těles, v závislosti na množství recyklovaného kameniva. Rovněž je uvedena hodnota indexu stárnutí. Zkušební teplota byla 0 °C. Největší náchylnost ke stárnutí vykazuje varianta BBTM 8NH s 30 % R-materiálu. Při tomto podílu R-materiálu je tedy směs BBTM 8NH náchylnější na iniciaci a následnou propagaci trhliny. Nicméně uvedené nelze podložit jasným trendem, protože varianta s 15 % R-materiálu naopak vykazuje v porovnání s výchozí variantou bez R-materiálu velmi dobré hodnoty.

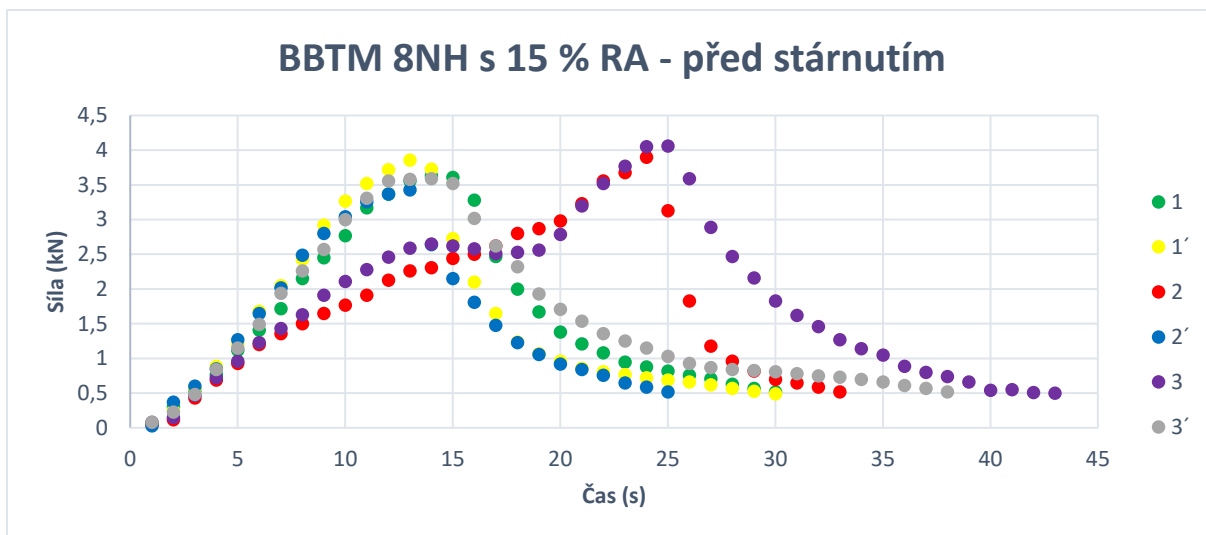


Graf 25: Hodnoty lomové houževnatosti a indexu stárnutí těles před stárnutím a po stárnutí u variant asfaltové směsi BBTM 8NH

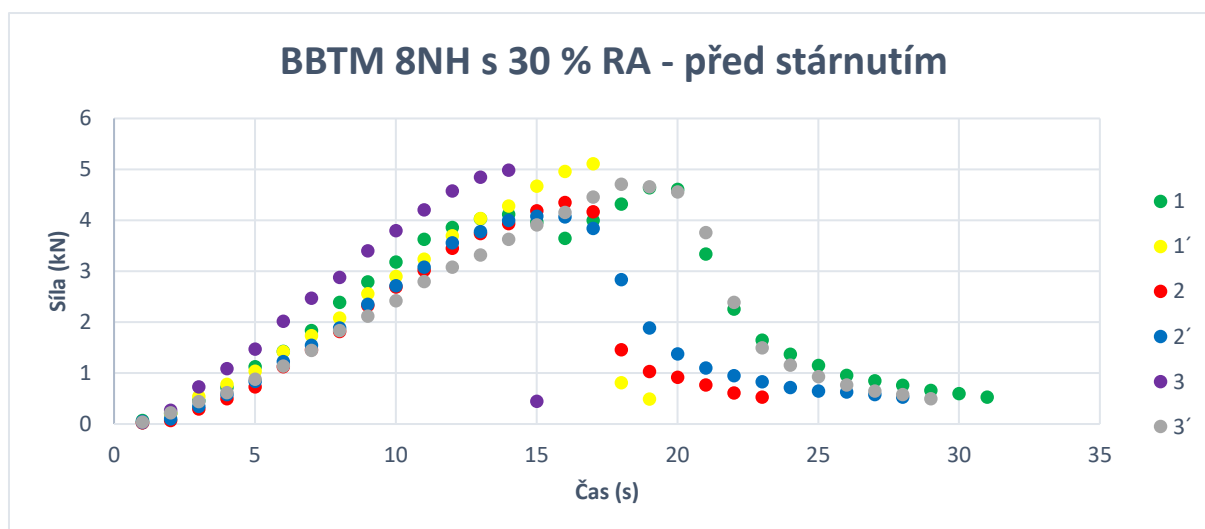
Níže uvedené grafy uvádějí porovnání pracovních diagramů zatěžování jednotlivých půlválcových zkušebních těles. Pro přehlednost jsou uvedeny pouze vzorky před laboratorním stárnutím. Je vidět pozvolný nárůst síly potřebné pro iniciaci trhliny i delší čas nutný k dosažení tohoto stavu. Zkušební teplota během zatěžování byla 0 °C.



Graf 26: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty BBTM 8NH s 0 % R-materiálu



Graf 27: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty BBTM 8NH s 15 % R-materiálu



Graf 28: Pracovní diagramy nezestárnutých těles varianty BBTM 8NH s 30 % R-materiálu

5.5 VÝSLEDKY ZKOUŠKY POJÍŽDĚNÍ KOLEM

Níže uvedené tabulky uvádějí výsledky zkoušky pojíždění kolem pro jednotlivé typy a varianty asfaltových směsí. Všechny zkoušky byly prováděny ve vzduchové lázni a při teplotě 50 °C. Pro všechny varianty asfaltových směsí jsou uvedeny hodnoty PRD_{AIR} (poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu v %) a WTS_{AIR} (přírůstek hloubky vyjeté koleje v mm/1000 zatěžovacích cyklů). Podrobné protokoly obsahující grafy s hloubkou vyjeté koleje pro levou a pravou stopu, jejich průměr a další naměřené hodnoty jsou součástí příloh této práce.

5.5.1 Asfaltová směs SMA 8NH

U variant s příměsí recyklovaného kameniva je vidět výrazný pokles poměrné hloubky koleje i jejího přírůstku během zatěžování. Tento trend koreluje s výsledky měření modulu tuhosti při vyšších teplotách, kdy došlo k jeho zvýšení, v závislosti na obsahu R-materiálu v asfaltové směsi. Pro výsledky uvedené v tabulce 14 platí, že mezní hodnotu pro je PRD_{AIR} 6,0 % a pro WTS_{AIR} je to hodnota 0,07 mm. Hodnotu WTS_{AIR} překročila varianta asfaltové směsi bez asfaltového R-materiálu, což nekoresponduje s výsledky uvedenými v ITT protokolu, kde při původním návrhu této směsi bylo dosaženo hodnoty 0,048 mm.

Varianta	WTS_{AIR} (mm)	PRD_{AIR} (%)
0 % RA	0,088	4,4
15 % RA	0,036	2,7
30 % RA	0,021	2,9

Tab. 14: Přírůstek hloubky vyjeté koleje a poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu u variant asfaltové směsi SMA 8NH

5.5.2 Asfaltová směs SMA 22L

Také u této směsi byl zaznamenán pokles hloubky vyjeté koleje i přírůstek hloubky vyjeté koleje u variant s příměsí recyklovaného kameniva. To rovněž odpovídá měření modulu tuhosti u této směsi při vyšších teplotách. Pro výsledky uvedené v tabulce 15 nejsou v ČR stanoveny žádné požadavky. Vydeme-li z německých technických předpisů, které upravují charakteristiky a meze pro tento typ asfaltové směsi, potom zde existuje pouze požadavek pro PRD_{AIR} s mezní hodnotou 5,0 %. Tuto hodnotu bezpečně splňují všechny varianty asfaltové směsi SMA 22L, přičemž výsledek pro variantu s 50 % R-materiálu lze v tomto ohledu považovat za více než nadstandardní.

Varianta	WTS _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)
0 % RA	0,029	3,2
30 % RA	0,015	2,2
50 % RA	0,016	1,8

Tab. 15: Přírůstek hloubky vyjeté koleje a poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu u variant asfaltové směsi SMA 22L

5.5.3 Asfaltová směs BBTM 8NH

U této směsi došlo k poklesu sledovaných veličin pouze u varianty s 30 % podílem recyklovaného kameniva. Naopak u varianty s 15 % příměsí recyklátu došlo k rapidnímu nárůstu. To příliš neodpovídá výsledkům měření modulu tuhosti, neboť u této varianty byl zaznamenán výrazný nárůst modulu tuhosti, z čehož lze usuzovat na menší náchylnost k vyjíždění kolejí. Pro výsledky uvedené v tabulce 16 platí, že mezní hodnotou pro PRD_{AIR} je 6,0 % a pro WTS_{AIR} je to hodnota 0,07 mm. Uvedené hodnoty splnily všechny posuzované varianty této asfaltové směsi.

Varianta	WTS _{AIR} (mm)	PRD _{AIR} (%)
0 % RA	0,039	3,6
15 % RA	0,065	4,8
30 % RA	0,031	2,9

Tab. 16: Přírůstek hloubky vyjeté koleje a poměrná hloubka vyjeté koleje na vzduchu u variant asfaltové směsi BBTM 8NH

6 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Použití recyklovaného kameniva, přesněji řečeno asfaltového R-materiálu, vedlo u nezestárnutých zkušebních těles ve většině případů ke zvýšení hodnot modulu tuhosti. Nejvýrazněji se tento trend projevil u asfaltové směsi BBTM 8NH, kde při teplotě 27 °C dosáhl modul tuhosti varianty s 30 % recyklovaného kameniva téměř dvojnásobku oproti variantě bez příměsi recyklovaného kameniva.

U vzorků podrobených simulovanému procesu stárnutí je většinou vidět nárůst hodnot modulu tuhosti. U variant asfaltové směsi BBTM 8NH došlo k nárůstu při všech teplotách, ale se zvyšujícím se množstvím recyklovaného kameniva byl tento nárůst méně výrazný. V tomto ohledu se jeví, jako kdyby asfaltová směs s vyšším podílem R-materiálu lépe odolávala vlivům termooxidativního stárnutí asfaltového pojiva. U asfaltových směsí SMA lze pozorovat nárůst hodnot modulu tuhosti především při teplotách 15 °C a 27 °C. Nejvýraznější byl nárůst při teplotě 27 °C. Obecně lze říci, že modul tuhosti se zvyšoval se zvyšujícím se podílem recyklovaného kameniva.

Vliv na pevnost v příčném tahu mělo použití recyklovaného kameniva nejvíce u asfaltové směsi BBTM 8NH. U asfaltové směsi SMA 22L se použití R-materiálu na pevnosti v příčném tahu téměř neprojevilo. V některých případech hodnota pevnosti dokonce poklesla oproti variantě bez příměsi recyklovaného kameniva. Nicméně příměs R-materiálu se negativně projevila na vodní citlivosti. To bylo patrné zejména u směsí typu SMA, kde došlo ke zhoršení vodní citlivosti o 10 - 15 %. Naopak u asfaltové směsi BBTM 8NH, kde se výsledné hodnoty jeví jako nelogické, se vodní citlivost u varianty s 15 % R-materiálu rapidně zvýšila. To může být způsobeno více faktory, například zkoušením pouze 3 těles od každé varianty asfaltové směsi pro každý stav saturace (suché, vodou saturované, vodou saturované + vystavené mrazu).

Mnohem více se přidání recyklovaného kameniva do asfaltové směsi projevilo u modulu pružnosti, který je výpočtovou charakteristikou, kterou lze při stanovení pevnosti v příčném tahu získat také. Zde lze pozorovat nárůst u směsí s menším maximálním zrnem kameniva, tj. u obou asfaltových směsí pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností – SMA 8NH a BBTM 8NH. U těchto směsí došlo s rostoucím podílem recyklovaného kameniva k rapidnímu nárůstu hodnot modulu pružnosti, a to jak u vzorků zkoušených za sucha, tak u vzorků vystavených působení mrazu a vody. To indikuje jejich zvýšenou odolnost vůči tvorbě trvalých deformací, což se víceméně potvrdilo při zkoušce poježdění kolem.

Na druhou stranu, příměs recyklovaného kameniva měla v některých případech negativní vliv na lomovou energii a lomovou houževnatost. U asfaltové směsi SMA 8NH došlo pouze k mírnému nárůstu hodnoty lomové energie a lomové houževnatosti u varianty s 30 % příměsí R-materiálu. U variant s příměsí R-materiálu bylo dále všeobecně pozorováno zkrácení celkového času zkoušky, tzn. doby, kdy docházelo k iniciaci a následné propagaci trhliny. Z tohoto poznatku a dalších údajů lze usuzovat, že po počáteční iniciaci trhliny (okamžik jejího vzniku) dojde k její rychlejší propagaci při stejné nebo mírně nižší vynaložené energii. Rozmezí hodnot indexu stárnutí nebylo příliš rozsáhlé, což znamená, že degradace směsi postupuje pomalu, resp. daná charakteristika asfaltové směsi není nijak citlivá na změny způsobené stárnutím asfaltové směsi (termooxidativní degradaci asfaltového pojiva).

U směsi SMA 22L došlo sice rovněž ke snížení hodnoty lomové energie a lomové houževnatosti, ale celkový čas zkoušky se příliš nezměnil. To ukazuje, že propagace trhliny postupuje podobnou rychlostí jak u zkušebních těles (resp. variant asfaltové směsi) bez R-materiálu, tak i u zkušebních těles s příměsí recyklovaného kameniva. Dalším důležitým parametrem je index stárnutí. Ten má u variant s příměsí R-materiálu větší rozsah. U varianty s 30 % podílem došlo ke značnému snížení hodnoty

lomové houževnatosti a tím k degradaci směsi. Naopak u varianty s 50 % příměsí došlo ke zvýšení hodnoty lomové houževnatosti. Nicméně i tyto hodnoty jsou nižší oproti variantě bez příměsí recyklovaného kameniva.

Směs BBTM 8NH vykazovala na rozdíl od směsí SMA nárůst hodnoty lomové energie a lomové houževnatosti u variant s příměsí R-materiálu. U varianty s 15 % příměsí došlo k mírnému nárůstu hodnot lomové houževnatosti (zestárnutá i nezestárnutá zkušební tělesa), přičemž celková doba zkoušky se téměř nezměnila. Varianta s 30 % podílem recyklovaného kameniva vykazovala podobný trend hodnot lomové houževnatosti pouze u nezestárnutých těles. Naopak u zestárnutých zkušebních těles se hodnota lomové houževnatosti rapidně snížila, což ovlivnilo index stárnutí. Celkový čas zkoušky se u nezestárnutých zkušebních těles mírně snížil. Tato skutečnost indikuje menší kumulované dopravní zatížení, kterou bude schopna vozovka pravděpodobně přenést.

7 ZÁVĚR

Recyklované asfaltové kamenivo (přesněji dle zavedené terminologie R-materiál) v řadě případů přispělo ke zlepšení vlastností asfaltových směsí. Obecně lze říci, že příměs R-materiálu se projevila zvýšením modulu tuhosti, což vedlo k větší odolnosti proti trvalým deformacím. To se projevilo při zkoušce pojíždění kolem, při níž hloubka koleje v některých případech klesla až na poloviční hodnotu. Na druhou stranu tato vyšší tuhost způsobila do jisté míry – byť ne ve všech případech – vyšší křehkost zkušebních těles a tím jejich vyšší náchylnost k tvorbě a šíření trhlin. To jasně ukázaly zkoušky šíření trhliny na půlválcových zkušebních tělesech. Rychlejší iniciace trhliny znamená, že při stejném dopravním zatížení dojde dříve k poruše konstrukční asfaltové vrstvy vozovky. Naopak, použití R-materiálu se v řadě případů projevilo pozitivně na indexu stárnutí. To může naznačovat lepší stabilitu asfaltové směsi v dlouhodobém měřítku. Otázkou, která nebyla nijak analyzována a podrobněji zkoumána, je skutečnost, že asfaltové směsi s R-materiálem obsahovaly oživovací přísadu (tzv. rejuvenátor) a není tedy zřejmé, nakolik takové chování asfaltové směsi bylo ovlivněno jeho přítomností ve směsi. Vyšší podíl R-materiálu se ale také v řadě případů negativně projevil na vodní citlivosti směsi, která se s jeho narůstajícím množstvím zhoršovala. V některých případech bylo zhoršení až 15 % ve srovnání s variantou bez R-materiálu. Bylo by vhodné provést další výzkumy, které by zjistily, nakolik je taková hodnota přiměřená, nebo naopak příliš vysoká.

I přes místy negativní výsledky se použití recyklovaného kameniva (R-materiálu) do asfaltových směsí, kde je zakázáno (asfaltové směsi pro obrusné vrstvy se sníženou hlučností) nebo kde s takovými směsmi nejsou v České republice zatím velké zkušenosti (směs SMA 22L), jeví jako perspektivní a bylo by vhodné zkoumat jeho vliv nadále. Nutnost provedení dalších studií a výzkumů je i z tohoto pohledu nesporná, ale lze doufat, že recyklované kamenivo se začne při výrobě asfaltových směsí používat v širším měřítku, což jistě přinese nemalé výhody uživatelům pozemních komunikací, životnímu prostředí a v konečném důsledku i správcům pozemních komunikací. Rozšíření využití R-materiálu i do dalších typů asfaltových směsí, než jsou asfaltové betony, kde se podle existujících norem dnes používat smí, je proto směr, který by bylo jistě vhodné podobnými zkušebními úseky podporovat.

Zaměříme-li se na otázku využitelnosti kombinace uvedených dvou typů asfaltových směsí pro obrusné vrstvy a nového typu asfaltové směsi pro ložní vrstvu, ukazují výsledky, že kombinace dané obrusné a ložní vrstvy z hlediska dosažených výsledků může vést ke kvalitnímu krytovému souvrství, které by mohlo podpořit myšlenku nízkoúdržbových krytů asfaltových vozovek. V rámci této práce nebyly provedeny výpočty podle metodiky navrhování netuhých vozovek, jak je uvádí TP 170, přesto dosažené hodnoty modulů tuhosti nebo ve většině případů bezproblémové hodnoty odolnosti asfaltové směsi proti trvalým deformacím dávají dobrý signál pro to, že podobná technická řešení mohou vést ke konstrukcím s delší životností, a tím i s menšími nároky na údržbu. Navíc se ukazuje, že použití R-materiálu, jak již bylo zmíněno výše, může takové technické řešení dále podpořit.

8 PŘEHLED POUŽITÉ LITERATURY

1. ČSN EN 12697-5 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 5: Stanovení maximální objemové hmotnosti* 2010
2. ČSN EN 12697-6 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 6: Stanovení objemové hmotnosti asfaltového zkušebního tělesa* 2012
3. ČSN EN 12697-7 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 7: Stanovení objemové hustoty* 2014
4. ČSN EN 12697-8 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 8: Stanovení mezerovitosti asfaltových směsí* 2004
5. ČSN EN 12697-12 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 12: Stanovení odolnosti zkušebního tělesa vůči vodě* 2009
6. ČSN EN 12697-22+A1 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 22: Zkouška pojíždění kolem* 2007
7. ČSN EN 12697-26 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 26: Tuhost* 2012
8. ČSN EN 12697-44 *Asfaltové směsi – Zkušební metody pro asfaltové směsi za horka – Část 44: Šíření trhliny zkouškou ohybem na půlválcovém zkušebním tělese* 2011
9. Landa, Filip. Diplomová práce, *Asfaltové směsi a technologie pro ložné vrstvy vozovek s dlouhou životností*, leden 2018, FSv ČVUT v Praze
10. Kudrna, Jan. Seminář *Návrh a stavba vozovek, Krytové vrstvy vozovek, Téma II: Materiály a hmoty ve výstavbě pozemních komunikací*, listopad 2011
11. Drüschner, Lothar a Schäfer, Volker. *Asphalt Guide: Stone Mastic Asphalt*, 2005
12. Europaen Asphalt Pavement Association. *Sustainable roads – Long-Life Asphalt Pavements. Version for “bankers”* 2007
13. Mondschein, Petr. *Silniční stavby 2, Asfaltové směsi 2017* FSv ČVUT v Praze Přednášky
14. TP 259 *Asfaltové směsi pro ohrusné vrstvy se sníženou hlučností* 2017
15. Rohedack, Gernot. *Stand des Regelwerkes bei neuen Asphaltbauweisen*, 2015
16. AASHTO T 283 *Standard Method of Test for Resistance of Compacted Asphalt Mixtures to Moisture-Inducted Damage* 2014
17. Valentin, Jan. Konference *Projektování pozemních komunikací, TP 259 – Asfaltové směsi pro ohrusné vrstvy se sníženou hlučností – K čemu je to dobré?* 2017
18. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Asphaltbauweisen, *Hinweise für die Planung und Ausführung von alternativen Asphaltbinderschichten* 2015
19. Mondschein, Petr. YSKL – přednáška 3, *Poruchy netuhých vozovek*, 2017 FSv ČVUT v Praze
20. Gutiérrez, Matías. Literature Review Study – *Transport Structures and Urban Planning, Risks arising from inappropriate pavement maintenance* 2017
21. Valentin, Jan. *Metodika pro návrh, výrobu a provádění asfaltových akustických vrstev*, 2015
22. TP 82 *Katalog poruch netuhých vozovek* 2010
23. TP 87 *Navrhování údržby a oprav netuhých vozovek* 2010
24. TKP 7 *Technické kvalitativní podmínky pozemních komunikací, kapitola 7: Hutněné asfaltové vrstvy*, 2008

9 PŘÍLOHY

9.1 Výsledky měření modulu tuhosti

SMA 8S s 0% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	2	12 344	11 602	11 973	12 993	100%	431,1	403,1	455,2	3,0	3,0	3,0	4,7	4,4	4,9
	3	16 946	10 574	13 760			570,7	395,4		2,9	3,2		6,0	4,2	
	4	14 868	11 743	13 306			505,4	415,6		2,9	3,0		5,5	4,5	
	5	13 372	12 491	12 932			463,4	457,2		2,9	3,1		5,0	4,9	
15	1	4 742	4 706	4 724	4 685	36%	258,4	250,4	253,3	5,0	4,9	5,0	2,8	2,7	2,7
	2	4 607	4 633	4 620			253,0	247,1		5,1	5,0		2,7	2,7	
	3	4 426	4 468	4 447			238,6	240,6		5,0	5,0		2,5	2,5	
	4	4 685	4 762	4 724			253,5	254,6		5,0	5,0		2,7	2,8	
	5	4 757	4 868	4 813			252,6	270,2		5,0	5,1		2,7	2,9	
	6	5 159	4 412	4 786			285,7	234,8		5,1	5,0		3,0	2,5	
27	2	1 645	1 610	1 628	1 632	13%	78,7	73,2	76,9	5,0	4,8	4,9	0,9	0,8	0,8
	3	1 876	1 477	1 677			88,3	66,4		5,0	4,8		0,9	0,7	
	4	1 664	1 436	1 550			77,1	63,4		4,8	4,7		0,8	0,7	
	5	1 639	1 710	1 675			81,9	86,1		5,1	5,2		0,9	0,9	

Tab. 17: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 0 % R-materiálu

SMA 8S s 15% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	12 613	12 410	12 512	12 646	100%	456,0	433,7	443,5	3,1	3,0	3,0	4,8	4,5	4,7
	2	12 812	12 593	12 703			452,7	439,4		3,0	3,0		4,8	4,7	
	3	12 812	12 405	12 609			444,4	433,1		3,0	3,0		4,8	4,7	
	4	13 447	12 075	12 761			473,5	415,5		3,0	3,0		5,0	4,4	
15	1	5 307	5 557	5 432	5 374	42%	284,7	301,2	289,0	5,0	5,0	5,0	3,0	3,1	3,1
	2	5 177	5 679	5 428			276,4	302,1		4,9	5,0		3,0	3,2	
	3	5 232	5 284	5 258			280,8	280,2		5,1	4,9		3,0	3,0	
	4	5 129	5 158	5 144			293,2	273,1		5,4	5,0		3,1	2,9	
	5	5 436	5 444	5 440			290,1	293,9		5,0	5,0		3,1	3,1	
	6	5 706	5 375	5 541			308,9	283,6		5,1	5,0		3,3	3,0	
27	1	1 817	1 903	1 860	1 972	16%	85,1	95,2	92,6	4,9	5,0	4,9	0,9	1,0	1,0
	2	1 998	1 894	1 946			91,9	87,3		4,9	4,9		1,0	0,9	
	3	2 035	1 986	2 011			93,5	97,5		4,9	5,1		1,0	1,1	
	4	2 003	2 143	2 073			92,4	97,5		4,8	4,8		1,0	1,0	

Tab. 18: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 15 % R-materiálu

SMA 8S s 30% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	12 120	11 070	11 595	11 750	100%	423,2	387,1	409,2	3,0	3,0	3,0	4,4	4,1	4,3
	2	12 190	11 641	11 916			425,0	398,0		3,0	2,9		4,4	4,2	
	3	12 546	11 944	12 245			434,1	414,9		3,0	3,0		4,4	4,2	
	4	11 230	11 255	11 243			398,5	393,0		3,0	3,0		4,2	4,2	
15	1	5 507	5 566	5 537	5 602	48%	300,2	293,0	295,0	5,2	5,0	5,0	3,2	3,1	3,1
	2	5 266	5 192	5 229			279,8	269,4		4,9	5,0		2,9	2,8	
	3	6 453	5 667	6 060			311,4	294,2		4,6	5,0		3,2	3,0	
	4	5 757	5 678	5 718			299,9	295,2		5,0	5,0		3,2	3,1	
	5	6 134	5 217	5 676			339,7	286,3		5,3	5,1		3,5	3,0	
	6	5 463	5 326	5 395			289,4	281,2		5,1	5,1		3,0	3,0	
27	1	1 951	2 000	1 976	1 977	17%	90,8	99,2	93,9	4,9	5,3	5,0	1,0	1,0	1,0
	2	1 831	1 922	1 877			85,5	91,0		4,9	5,0		0,9	1,0	
	3	2 087	2 026	2 057			101,1	94,0		5,1	4,9		1,0	1,0	
	4	2 061	1 941	2 001			97,9	91,6		5,1	4,9		1,0	1,0	

Tab. 19: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 0% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	14 910	15 722	15 316	16 600	100%	520,2	551,0	575,1	3,0	3,0	3,0	5,0	5,3	5,6
	2	16 592	16 525	16 559			567,7	574,1		2,9	3,0		5,4	5,5	
	3	17 515	18 945	18 230			603,3	659,5		2,9	3,0		6,0	6,6	
	5	16 148	16 443	16 296			546,3	578,4		2,9	3,0		5,2	5,5	
15	1	7 442	9 586	8 514	7 914	48%	410,7	523,0	424,9	5,1	5,1	5,0	4,0	5,1	4,1
	2	7 607	7 752	7 680			415,5	424,4		5,0	5,0		4,0	4,1	
	3	8 988	8 284	8 636			483,1	445,0		5,0	5,0		4,8	4,4	
	5	8 353	7 109	7 731			445,3	385,9		5,0	5,0		4,3	3,7	
	6	7 317	6 901	7 109			391,4	367,9		5,0	5,0		3,9	3,7	
	7	8 947	8 123	8 535			461,5	425,4		4,9	4,9		4,5	4,1	
	8	7 565	7 563	7 564			397,1	409,8		4,9	5,1		3,8	3,9	
	9	7 745	7 348	7 547			416,8	396,1		5,0	5,0		4,1	3,9	
27	6	3 385	2 759	3 072	3 196	19%	152,3	121,7	148,2	4,7	4,6	4,8	1,5	1,2	1,4
	7	3 407	3 550	3 479			161,8	159,8		5,0	4,7		1,6	1,6	
	8	3 124	2 967	3 046			146,2	138,9		4,9	4,9		1,4	1,3	
	9	2 866	3 511	3 189			136,3	168,7		4,9	5,0		1,3	1,6	

Tab. 20: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 22L s 0 % R-materiálu

SMA 22L s 30% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	11 620	13 223	12 422	13 506	100%	422,8	475,2	476,6	3,1	3,1	3,0	4,7	5,3	5,1
	2	13 212	14 195	13 704			501,8	460,6		3,0	3,0		5,0	5,4	
	3	15 349	13 869	14 609			525,9	484,4		2,9	3,0		5,6	5,2	
	4	13 249	13 328	13 289			468,0	474,0		3,0	3,0		4,6	5,1	
15	1	8 169	8 200	8 185	9 233	68%	441,8	398,4	489,1	5,1	4,6	5,0	4,9	4,5	5,3
	2	10 073	9 039	9 556			530,0	478,1		5,0	5,0		5,7	5,2	
	3	10 295	9 912	10 104			545,8	529,9		5,1	5,1		5,8	5,7	
	4	9 520	10 147	9 834			506,2	537,6		5,0	5,0		5,5	5,9	
	5	8 415	8 710	8 563			443,8	467,4		5,0	5,1		4,9	5,1	
	7	7 992	7 826	7 909			422,8	415,4		5,0	5,0		4,4	4,3	
	9	9 826	10 091	9 959			534,0	540,7		5,0	5,0		5,5	5,6	
	10	9 933	9 587	9 760			526,6	507,5		5,1	5,0		5,6	5,4	
27	5	4 604	4 723	4 664	4 919	36%	218,2	227,9	236,4	4,9	5,1	5,0	2,4	2,5	2,5
	7	4 614	4 422	4 518			217,8	215,1		4,9	5,1		2,3	2,2	
	9	4 925	5 489	5 207			244,3	256,6		5,1	5,0		2,5	2,7	
	10	5 226	5 352	5 289			253,6	257,9		5,0	5,0		2,7	2,7	

Tab. 21: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 22L s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 50% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	20 284	21 107	20 696	20 561	100%	720,8	757,9	644,0	3,0	3,1	3,0	7,3	7,7	7,5
	2	18 737	18 081	18 409			666,6	642,2		3,0	3,0		6,8	6,5	
	3	19 919	21 583	20 751			7,4	761,6		3,0	3,0		7,4	8,0	
	4	23 047	21 733	22 390			816,0	779,1		3,0	3,0		8,3	8,0	
15	1	10 480	11 784	11 132	10 220	50%	558,2	629,4	547,6	5,0	5,0	5,0	5,7	6,4	5,7
	2	9 560	11 589	10 575			512,5	613,6		5,0	5,0		5,2	6,3	
	3	9 739	9 990	9 865			527,1	528,8		5,1	5,0		5,5	5,5	
	4	11 038	10 534	10 786			586,3	562,5		5,0	5,0		6,0	5,7	
	5	10 211	10 274	10 243			547,0	564,7		5,0	4,9		5,6	5,8	
	6	9 585	9 056	9 321			519,8	481,5		5,1	5,0		5,5	5,1	
	7	10 467	10 686	10 577			557,9	572,2		5,0	5,0		5,8	6,0	
	8	8 968	9 562	9 265			481,7	518,1		5,0	5,1		5,0	5,4	
27	5	4 596	4 199	4 398	4 221	21%	221,3	203,1	203,2	5,0	5,0	5,0	2,3	2,1	2,1
	6	3 825	3 934	3 880			185,3	189,9		5,0	5,0		2,0	2,0	
	7	4 466	4 224	4 345			217,9	199,7		5,0	5,0		2,3	2,1	
	8	4 365	4 158	4 262			207,0	201,7		5,0	5,1		2,1	2,1	

Tab. 22: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi SMA 22L s 50 % R-materiálu

BBTM 8 s 0% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	8 460	8 856	8 658	8 607	100%	294,3	305,7	298,2	3,0	2,9	3,0	3,2	3,3	3,3
	2	8 256	9 331	8 794			289,4	321,1		3,0	2,9		3,2	3,5	
	3	8 252	8 160	8 206			281,8	280,1		3,0	3,0		3,1	3,1	
	4	8 549	8 990	8 770			292,5	320,7		2,9	3,1		3,2	3,5	
15	1	4 084	3 743	3 914	3 904	45%	221,7	201,7	208,9	5,1	5,1	5,1	2,4	2,2	2,3
	2	3 768	3 798	3 783			203,0	208,2		5,1	5,1		2,2	2,3	
	3	3 904	4 414	4 159			203,0	228,1		5,0	5,0		2,2	2,5	
	4	4 541	4 012	4 277			246,6	214,7		5,2	5,0		2,7	2,4	
	5	3 575	3 310	3 443			189,9	175,3		4,9	5,0		2,1	2,0	
	6	3 925	3 772	3 849			210,5	203,9		5,1	5,1		2,3	2,2	
27	1	1 346	1 270	1 308	1 306	15%	63,4	58,4	61,6	5,0	4,8	5,0	0,7	0,6	0,7
	2	1 324	1 224	1 274			64,6	58,3		5,2	4,8		0,7	0,6	
	3	1 317	1 235	1 276			59,8	57,7		4,9	5,0		0,7	0,6	
	4	1 437	1 295	1 366			71,2	59,3		5,3	4,8		0,7	0,8	

Tab. 23: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 0 % R-materiálu

BBTM 8 s 15% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	11 012	9 748	10 380	9 900	100%	375,5	334,0	344,8	2,9	2,9	3,0	3,9	3,5	3,6
	2	9 251	9 089	9 170			327,1	324,9		3,0	3,1		3,4	3,4	
	3	9 277	11 151	10 214			324,0	392,1		3,0	3,0		3,4	4,1	
	4	10 620	9 048	9 834			365,9	314,9		3,0	3,0		3,8	3,3	
15	1	4 123	4 299	4 211	4 686	47%	222,5	227,9	246,9	5,1	5,0	5,0	2,3	2,4	2,6
	2	4 676	4 055	4 366			245,8	216,2		5,0	5,0		2,6	2,3	
	3	5 079	4 669	4 874			277,7	247,8		5,2	5,0		2,9	2,6	
	4	4 927	4 994	4 961			244,2	248,2		4,9	4,9		2,6	2,6	
	5	4 882	4 582	4 732			263,1	242,2		5,1	5,1		2,8	2,5	
	6	5 253	4 693	4 973			276,8	250,8		5,0	5,1		2,9	2,6	
27	1	1 747	1 621	1 684	1 710	17%	81,2	72,8	80,8	4,8	4,9	4,9	0,8	0,8	0,9
	2	1 688	1 583	1 636			77,9	83,5		4,9	5,3		0,8	0,9	
	3	1 641	1 810	1 726			75,1	84,9		4,8	4,9		0,8	0,9	
	4	1 843	1 744	1 794			87,8	82,8		4,9	4,9		0,9	0,9	

Tab. 24: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 15 % R-materiálu

BBTM 8 s 30% RA		Stiffness modulus					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	1	11 598	11 058	11 328	11 212	100%	412,9	387,0	399,8	3,0	3,0	3,0	4,3	4,0	4,1
	2	10 986	10 322	10 654			390,1	361,6		3,0	3,0		4,1	3,8	
	3	10 623	10 853	10 738			374,8	379,8		3,0	3,0		3,9	3,9	
	4	12 072	12 185	12 129			420,3	423,9		3,0	3,0		4,4	4,4	
15	1	5 930	6 075	6 003	6 183	55%	317,1	318,0	326,3	5,0	4,9	5,0	3,3	3,3	3,4
	2	5 953	5 889	5 921			317,3	313,0		5,1	5,0		3,3	3,3	
	3	6 068	5 747	5 908			321,1	304,1		5,0	5,1		3,3	3,1	
	4	6 862	6 522	6 692			345,9	346,7		4,9	5,0		3,6	3,6	
	5	6 484	6 654	6 569			338,5	357,5		5,0	5,1		3,6	3,8	
	6	6 138	5 870	6 004			325,2	310,7		5,0	5,1		3,5	3,3	
27	1	2 573	2 591	2 582	2 574	23%	127,3	121,6	122,7	5,2	4,9	5,1	1,3	1,3	1,3
	2	2 477	2 463	2 470			117,9	117,1		5,1	5,1		1,2	1,2	
	3	2 465	2 423	2 444			117,0	113,8		5,1	5,0		1,2	1,2	
	4	2 945	2 658	2 802			142,3	124,8		5,1	5,0		1,5	1,3	

Tab. 25: Hodnoty modulu tuhosti u nezestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 30 % R-materiálu

9.2 Výsledky měření modulu tuhosti u těles po stárnutí

SMA 8S s 0% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	14 163	10 397	12 280	11 589	100%	526,2	368,5	414,4	3,2	3,0	3,1	5,7	4,0	4,4
	5	11 036	12 497	11 767			389,0	432,7		3,0	3,0		4,2	4,6	
	6	10 790	10 650	10 720			386,1	383,7		3,0	3,1		4,1	4,0	
15	4	5 619	5 272	5 446	5 497	47%	298,4	279,0	296,7	5,0	5,0	5,0	3,2	3,0	3,2
	5	5 572	5 487	5 530			301,5	299,0		5,0	5,0		3,2	3,2	
	6	5 428	5 602	5 515			297,1	305,0		5,0	5,0		3,1	3,2	

Tab. 26: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 0 % R-materiálu

SMA 8S s 15% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	11 866	12 034	11 950	11 405	100%	416,6	420,6	397,3	3,0	3,0	3,0	4,4	4,4	4,2
	5	11 396	11 932	11 664			381,9	404,1		2,9	2,9		4,0	4,3	
	6	10 527	10 674	10 601			377,0	383,7		3,1	3,1		4,0	4,1	
15	4	7 407	6 278	6 843	6 415	56%	402,6	339,6	347,0	5,2	5,0	5,0	4,3	3,6	3,7
	5	5 850	6 635	6 243			315,7	361,9		5,0	5,0		3,3	3,8	
	6	6 490	5 831	6 161			340,2	322,2		4,8	5,1		3,6	3,4	

Tab. 27: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 15 % R-materiálu

SMA 8S s 30% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	11 034	12 111	11 573	11 219	100%	393,5	388,6	388,1	3,0	2,9	3,0	4,2	4,1	4,1
	5	11 387	11 417	11 402			400,7	396,7		3,0	2,9		4,1	4,1	
	6	10 399	10 968	10 684			360,0	389,0		2,9	3,0		3,8	4,1	
15	4	6 420	5 991	6 206	6 045	54%	331,4	317,0	316,3	4,9	5,1	5,0	3,5	3,4	3,3
	5	6 181	6 037	6 109			327,3	317,9		5,0	5,0		3,4	3,3	
	6	5 643	5 999	5 821			296,5	307,7		5,0	5,0		3,1	3,2	

Tab. 28: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 8NH s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 0% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	5	20 232	19 513	19 873	18 895	100%	705,2	698,0	662,3	3,0	3,1	3,0	6,7	6,7	6,4
	6	18 820	17 666	18 243			663,4	630,0		3,0	3,0		6,7	6,3	
	7	19 941	21 271	20 606			701,0	728,2		3,0	2,9		6,8	7,1	
	8	17 275	16 439	16 857			600,1	572,1		3,0	3,0		5,7	5,4	
15	5	9 235	9 165	9 200	9 012	48%	497,0	485,9	472,8	5,1	5,0	5,0	4,7	4,6	4,6
	6	8 349	8 254	8 302			442,4	439,0		5,0	5,0		4,4	4,4	
	7	9 594	9 441	9 518			488,7	484,6		4,9	4,9		4,8	4,7	
	8	9 025	8 963	8 994			481,7	456,7		5,0	4,9		4,6	4,3	
27	9	8 979	9 118	9 049	3 935	21%	478,6	473,5	187,4	5,0	4,9	5,0	4,7	4,6	1,8
	5	3 963	3 954	3 959			190,1	190,0		5,1	5,1		1,8	1,8	
	6	4 068	3 799	3 934			195,5	172,2		5,1	4,8		2,0	1,7	
	7	4 291	4 052	4 172			207,0	192,6		5,1	5,0		2,0	1,9	
	8	3 823	3 528	3 676			183,9	168,0		5,1	5,0		1,7	1,6	

Tab. 29: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 22L s 0 % R-materiálu

SMA 22L s 30% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	16 691	19 555	18 123	17 067	100%	581,4	680,6	600,6	3,0	3,0	3,0	6,3	7,4	6,4
	5	15 329	16 124	15 727			536,9	570,7		3,0	3,0		5,9	6,3	
	6	17 844	18 449	18 147			626,6	652,2		3,0	3,0		6,5	6,7	
	7	15 733	16 810	16 272			552,1	603,9		3,0	3,1		5,7	6,3	
15	4	11 832	11 078	11 455	11 443	67%	623,1	602,3	606,2	5,0	5,2	5,0	6,8	6,6	6,4
	5	10 451	11 821	11 136			555,7	623,5		5,0	5,0		6,1	6,8	
	6	12 360	11 572	11 966			651,2	613,2		5,0	5,0		6,5	6,3	
	7	11 489	11 560	11 525			586,5	606,4		5,0	5,0		6,1	6,3	
	8	9 678	10 344	10 011			514,3	550,9		5,0	5,0		5,5	5,9	
	9	12 102	12 491	12 297			640,1	666,3		5,0	5,0		6,6	6,9	
27	10	11 563	11 860	11 712	6 833	40%	615,6	637,5	328,3	5,1	5,1	5,1	6,5	6,7	3,5
	4	7 588	7 042	7 315			375,8	342,8		5,2	5,1		4,1	3,7	
	5	6 085	6 023	6 054			287,6	288,2		5,1	5,0		3,2	3,2	
	6	8 444	6 332	7 388			405,7	304,4		5,0	5,0		4,2	3,1	
	7	6 742	6 409	6 576			320,2	301,9		5,0	5,0		3,3	3,1	

Tab. 30: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 22L s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 50% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	21 617	21 437	21 527	19 883	100%	766,4	746,0	700,3	3,0	3,0	3,0	7,8	7,6	7,3
	5	19 910	19 960	19 935			701,0	710,8		3,0	3,1		7,2	7,3	
	6	18 184	17 302	17 743			630,7	617,5		3,0	3,0		6,7	6,6	
	7	19 930	20 720	20 325			712,5	717,7		3,1	3,0		7,4	7,5	
15	4	11 999	13 019	12 509	11 380	57%	628,7	673,9	593,0	5,0	4,9	5,0	6,4	6,9	6,2
	5	11 098	11 652	11 375			575,3	597,9		4,9	4,9		5,9	6,2	
	6	10 679	10 033	10 356			556,8	528,2		5,0	5,0		5,9	5,6	
	7	11 773	11 263	11 518			621,9	575,5		5,0	4,9		6,5	6,0	
	8	11 725	10 562	11 144			611,0	560,3		5,0	5,0		6,3	5,8	
27	4	5 912	5 519	5 716	5 534	28%	276,7	266,4	262,7	4,9	5,1	5,0	2,8	2,7	2,8
	5	5 285	5 629	5 457			252,3	277,3		5,0	5,1		2,9	2,9	
	6	4 769	5 561	5 165			230,4	247,1		5,0	4,7		2,5	2,6	
	7	5 467	6 133	5 800			257,6	293,9		4,9	5,0		2,7	3,1	

Tab. 31: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi SMA 22L s 50 % R-materiálu

BBTM 8 s 0% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	11 379	10 647	11 013	10 157	100%	403,1	376,3	357,8	3,0	3,0	3,0	4,4	4,1	4,0
	5	9 223	9 088	9 156			366,7	358,4		3,0	3,0		4,0	4,0	
	6	10 387	10 216	10 302			324,8	317,6		3,0	3,0		3,6	3,6	
15	4	5 098	5 334	5 216	5 133	51%	274,4	283,8	271,8	5,1	5,1	5,1	3,0	3,1	3,0
	5	5 270	4 833	5 052			279,4	254,4		5,0	5,0		3,1	2,9	
	6	5 118	5 147	5 133			269,7	268,8		5,1	5,0		3,0	3,0	

Tab. 32: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 0 % R-materiálu

BBTM 8 s 15% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	10 624	10 680	10 652	10 290	100%	368,2	377,4	361,4	3,0	3,0	3,0	3,9	4,0	3,8
	5	10 672	11 017	10 845			373,2	391,3		3,0	3,0		3,9	4,1	
	6	9 677	9 068	9 373			339,2	319,0		3,0	3,0		3,6	3,3	
15	4	6 111	5 757	5 934	5 645	55%	321,2	304,7	297,1	5,0	5,1	5,0	3,4	3,2	3,1
	5	5 921	5 696	5 809			309,6	299,8		5,0	5,0		3,2	3,1	
	6	5 066	5 317	5 192			269,0	278,2		5,0	5,0		2,8	2,9	

Tab. 33: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 15 % R-materiálu

BBTM 8 s 30% RA		Stiffness modulus - ageing					Horizontal stress			Horizontal deformation			Vertical force		
Temperature (°C)	Specimen	1. direction	2. direction	Average (MPa)	Stiffness (MPa)	relative value	1. direction (kPa)	2. direction (kPa)	Average (kPa)	1. direction (micron)	2. direction (micron)	Average (micron)	1. direction (kN)	2. direction (kN)	Average (kN)
0	4	13 369	12 425	12 897	12 206	100%	456,5	443,5	434,7	3,0	3,0	3,0	4,7	4,6	4,6
	5	11 835	11 447	11 641			429,3	410,9		3,1	3,0		4,5	4,3	
	6	12 254	11 906	12 080			442,7	425,5		3,1	3,0		4,8	4,6	
15	4	7 866	7 841	7 854	7 200	59%	410,7	417,9	380,4	5,0	5,1	5,0	4,3	4,3	4,0
	5	7 004	7 026	7 015			373,0	376,2		5,0	5,0		3,9	4,0	
	6	6 708	6 754	6 731			347,9	356,5		4,9	5,0		3,7	3,8	

Tab. 34: Hodnoty modulu tuhosti u zestárnutých těles u směsi BBTM 8NH s 30 % R-materiálu

9.3 Výsledky zkoušek šíření trhliny

SMA 8 s 0 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření		Rozdíl od průměru
		b	l	h		Δ	F	ai	f(ai/Wi)			ε _{max,i}	ε _{max,i}	
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)			(%)	(%)	
virgin	2	51,79	101,08	47,63	0°C	1,05	4,89	10	7,536	3,98	4,63	30,01	2,20	88%
	2'	51,39	101,74	51,18		0,81	6,69	10	7,290	5,45		39,77	1,58	116%
	3	51,53	101,80	50,43		0,64	6,44	10	7,341	5,23		38,42	1,27	112%
	3'	50,84	101,20	48,05		0,76	4,66	10	7,506	3,86		28,98	1,58	85%
aged	4	53,77	101,86	48,46	0°C	0,56	5,54	10	7,477	4,31	4,13	32,21	1,15	105%
	4'	53,77	102,14	49,97		0,75	6,19	10	7,372	4,80		35,39	1,49	115%
	5	52,74	101,64	50,34		0,53	4,98	10	7,347	3,96		29,07	1,05	95%
	5'	53,25	100,76	47,59		0,46	4,48	10	7,539	3,56		26,81	0,97	87%
	6	51,92	101,73	49,66		0,62	5,25	10	7,394	4,24		31,33	1,24	102%
	6'	52,28	101,46	48,23		0,48	4,86	10	7,493	3,91		29,27	1,00	95%

Tab. 35 Parametry zkušebních půlválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 8NH s 0 % R-materiálu

SMA 8 s 15 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření		Rozdíl od průměru
		b	l	h		Δ	F	ai	f(ai/Wi)			ε _{max,i}	ε _{max,i}	
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)			(%)	(%)	
virgin	1	53,51	101,12	48,16	0°C	0,68	5,94	10	7,498	4,68	4,51	35,06	1,41	105%
	1'	54,19	102,80	50,51		1,76	5,24	10	7,335	4,01		29,39	3,48	88%
	2	53,36	101,45	48,81		0,35	5,71	10	7,452	4,49		33,48	0,71	100%
	2'	54,43	101,64	50,52		0,44	6,74	10	7,335	5,19		38,09	0,87	114%
	3	51,81	101,02	47,87		0,47	6,14	10	7,519	5,00		37,57	0,97	113%
	3'	52,82	101,63	51,19		0,63	4,62	10	7,289	3,67		26,74	1,22	80%
aged	4	51,59	101,21	49,31	0°C	0,47	4,88	10	7,418	3,98	3,70	29,53	0,95	107%
	4'	51,19	101,27	48,70		0,79	4,83	10	7,460	3,97		29,63	1,62	108%
	5	52,78	100,70	48,66		0,68	4,08	10	7,463	3,27		24,39	1,39	89%
	5'	53,41	101,17	49,25		0,79	4,57	10	7,422	3,61		26,76	1,60	97%
	6	52,36	100,39	46,48		0,48	4,12	10	7,619	3,34		25,43	1,02	92%
	6'	52,17	101,42	51,87		0,59	5,05	10	7,244	4,06		29,44	1,14	107%

Tab. 36 Parametry zkušebních půlválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 8NH s 15 % R-materiálu

SMA 8 s 30 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření	Rozdíl od průměru			
		b	l	h		Δ	F	ai	f(ai/Wi)	σ _{max,i}	K _{ic,i}	ε _{max,i}				
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(%)				
virgin	1	50,68	101,52	48,56	0°C	0,64	4,78	10	7,470	3,96	4,31	29,56	1,31	1,46	92%	
	1'	50,34	101,43	49,36		0,77	5,27	10	7,414	4,40		32,59			1,55	102%
	2	52,08	101,45	48,96		0,62	5,67	10	7,442	4,57		34,05			1,26	106%
	2'	51,65	101,40	48,63		0,69	5,52	10	7,465	4,49		33,51			1,41	104%
	3	53,03	101,61	49,16		0,86	5,03	10	7,428	3,98		29,53			1,75	92%
	3'	52,73	101,33	49,07		0,73	5,63	10	7,434	4,49		33,36			1,49	104%
aged	4	49,41	101,77	48,68	0°C	0,62	5,90	10	7,462	5,00	4,71	37,29	1,27	1,54	106%	
	4'	49,27	101,28	49,66		0,95	6,22	10	7,393	5,31		39,26			1,90	112%
	5	49,36	100,97	48,95		0,79	5,16	10	7,443	4,41		32,85			1,61	94%
	5'	48,35	101,11	48,69		0,76	5,82	10	7,461	5,08		37,87			1,56	108%
	6	50,50	101,32	49,05		0,71	5,65	10	7,436	4,71		35,00			1,45	100%
	6'	49,64	101,74	49,37		0,71	4,48	10	7,414	3,78		28,00			1,44	87%

Tab. 37 Parametry zkušebních půlválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 8NH s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 0 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota		Přetvoření	Rozdíl od průměru
		b	l	h		Δ	F	ai	f(ai/Wi)	σ _{max,i}	K _{ic,i}	ε _{max,i}		
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(Nmm ^{3/2})	(%)		
virgin	1	47,95	101,10	47,70	0°C	1,00	6,54	10	7,531	5,75	6,08	43,28	2,09	96%
	1'	49,35	101,56	49,98		0,67	6,94	10	7,371	5,90		43,48	1,33	96%
	2	49,58	101,96	49,71		0,78	7,83	10	7,390	6,60		48,80	1,57	108%
	2'	47,23	101,87	49,30		0,60	6,78	10	7,418	6,01		44,56	1,21	99%
	3	50,23	101,46	48,82		0,83	7,74	10	7,452	6,47		48,21	1,70	107%
	3'	51,85	101,45	49,04		0,61	7,11	10	7,436	5,76		42,85	1,24	95%
aged	5	50,46	100,60	49,85	0°C	0,62	8,44	10	7,380	7,09	7,19	52,32	1,23	98%
	6	50,92	101,38	49,58		1,22	11,73	10	7,399	9,68		71,65	2,46	134%
	7	49,35	101,27	49,34		0,63	7,85	10	7,416	6,70		49,66	1,28	93%
	8	50,05	101,29	48,36		0,86	6,30	10	7,484	5,30		39,65	1,78	74%
fatigue	5'	50,30	100,71	47,42	15°C	0,84	4,35	10	7,551	3,66	3,88	27,61	1,77	95%
	6'	49,47	101,16	47,51		0,94	4,07	10	7,544	3,47		26,16	1,98	90%
	7'	50,03	101,03	48,48		1,04	4,79	10	7,476	4,04		30,20	2,15	104%
	8'	50,42	101,22	49,34		0,69	5,21	10	7,416	4,35		32,28	1,40	111%

Tab. 38 Parametry zkušebních půlválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 22L s 0 % R-materiálu

SMA 22L s 30 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota	Přetvoření	Rozdil od průměru			
		b	l	h		Δ	F	ai	f(ai/Wi)	σ _{max,i}	Kic,i	ε _{max,i}				
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ²)	(%)				
virgin	1	51,90	101,25	48,35	0°C	0,42	5,41	10	7,485	4,39	5,28	32,85	39,16	1,38	84%	
	1'	51,60	101,54	49,68		0,80	7,51	10	7,392	6,11		45,14			1,60	115%
	2	50,62	101,98	50,75		0,63	7,30	10	7,319	6,02		44,09			1,23	113%
	2'	51,42	101,74	47,87		0,56	5,02	10	7,519	4,09		30,76			1,16	79%
	3	52,35	101,35	49,75		0,98	6,47	10	7,387	5,19		38,37			1,96	98%
	3'	51,61	101,37	48,41		0,70	7,18	10	7,480	5,85		43,73			1,45	112%
aged	8	49,66	100,34	47,67	0°C	0,77	4,57	10	7,533	3,91	3,82	29,42	28,46	1,22	103%	
	8'	50,60	100,91	50,20		0,38	4,30	10	7,357	3,59		26,41			0,75	93%
	9	50,34	100,75	48,80		0,86	4,70	10	7,453	3,95		29,42			1,75	103%
	9'	49,46	100,55	48,97		0,88	6,27	10	7,442	5,37		39,97			1,79	140%
	10	49,30	100,64	47,35		0,31	3,05	10	7,556	2,62		19,80			0,65	70%
	10'	49,60	101,56	50,31		0,40	4,15	10	7,349	3,51		25,78			0,80	91%
fatigue	4'	50,39	100,51	47,62	15°C	0,86	2,49	10	7,537	2,10	2,94	15,80	22,02	1,29	72%	
	5'	51,01	100,85	48,90		0,45	3,27	10	7,446	2,71		20,15			0,92	91%
	6'	50,35	100,47	48,38		0,50	4,23	10	7,483	3,56		26,67			1,02	121%
	7'	50,95	101,27	48,63		0,68	4,13	10	7,465	3,41		25,47			1,40	116%

Tab. 39 Parametry zkušebních půlválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 22L s 30 % R-materiálu

SMA 22L s 50 %RA	Těleso	Šířka	délka	výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	hloubka dráž	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota		Přetvoření	Rozdíl od průměru	
		b	l	h		Δ	F	ai	f(a W)	σ _{max,i}	K _{IC,i}	ε _{max,i}			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})		(%)		
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})		(%)		
virgin	1	51,10	100,95	46,66	0°C	0,87	4,40	10	7,606	3,64	3,80	27,66	28,28	1,85	98%
	1'	51,11	101,74	50,72		0,70	5,70	10	7,321	4,67		34,18		1,37	121%
	2	50,96	101,08	48,02		0,84	4,65	10	7,508	3,85		28,89		1,75	102%
	2'	49,33	101,00	50,74		0,58	3,56	10	7,320	3,04		22,26		1,14	79%
	3	53,12	101,74	47,43		0,61	5,14	10	7,550	4,05		30,61		1,28	108%
	3'	53,85	101,67	49,69		0,69	4,54	10	7,391	3,53		26,10		1,38	92%
aged	4	50,17	100,78	50,44	0°C	0,55	5,34	10	7,340	4,50	5,01	33,05	37,18	1,09	89%
	5	51,27	101,30	48,75		1,26	6,54	10	7,457	5,37		40,03		2,58	108%
	6	51,61	100,77	49,31		0,87	6,76	10	7,418	5,54		41,07		1,75	110%
	7	51,03	100,83	48,59		0,76	5,59	10	7,468	4,63		34,56		1,56	93%
	4'	50,91	100,61	47,21		1,07	5,14	10	7,566	4,28		32,36		2,26	104%
fatigue	5'	50,75	101,09	48,45	15°C	0,72	4,18	10	7,478	3,47	4,17	25,94	31,25	1,49	83%
	6'	51,24	100,87	47,95		0,76	4,40	10	7,513	3,62		27,24		1,59	87%
	7'	50,26	101,31	48,70		0,90	6,32	10	7,460	5,29		39,47		1,84	126%

Tab. 40 Parametry zkušebních půválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs SMA 22L s 50 % R-materiálu

BBTM 8 s 0 %RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota		Přetvoření	Rozdíl od průměru	
		b	l	h		Δ	F	a _i	f(a _i /W _i)	σ _{max,i}	K _{ic,i}	ε _{max,i}			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(%)			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(mm)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(%)			
virgin	1	51,98	101,03	48,17	0°C	0,51	3,84	10	7,497	3,11	2,94	23,34	21,84	1,05	107%
	1'	50,96	100,65	49,25		0,45	3,63	10	7,422	3,02		22,39		0,90	103%
	2	51,35	100,91	49,17		0,62	3,12	10	7,427	2,56		19,03		1,26	87%
	2'	51,87	101,13	48,84		0,55	3,89	10	7,450	3,16		23,55		1,13	108%
	3	51,97	102,04	49,28		0,67	3,62	10	7,420	2,91		21,56		1,36	99%
	3'	51,91	102,20	50,14		0,64	3,58	10	7,361	2,88		21,17		1,28	97%
aged	4	49,65	100,88	50,26	0°C	0,55	3,09	10	7,352	2,63	2,97	19,34	22,04	1,08	88%
	4'	49,98	100,68	48,20		0,40	3,43	10	7,495	2,90		21,75		0,83	99%
	5	49,48	101,00	48,89		1,09	4,14	10	7,447	3,53		26,27		2,22	119%
	5'	49,70	101,35	49,30		0,38	3,09	10	7,418	2,61		19,37		0,76	88%
	6	49,62	101,66	49,49		0,56	4,36	10	7,405	3,68		27,29		1,12	124%
	6'	48,95	101,35	48,96		0,78	2,86	10	7,442	2,45		18,26		1,58	83%

Tab. 41 Parametry zkušebních půválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs BBTM 8NH s 0 % R-materiálu

BBTM 8 s 15 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota		Přetvoření	Rozdíl od průměru	
		b	l	h		Δ	F	a _i	f(a _i /W _i)	σ _{max,i}	K _{ic,i}	ε _{max,i}			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(%)			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ^{3/2})	(%)			
virgin	1	52,41	100,71	48,76	0°C	0,58	3,62	10	7,456	2,92	3,07	21,77	22,85	1,18	95%
	1'	51,74	101,31	49,80		0,54	3,86	10	7,384	3,14		23,18		1,08	101%
	2	51,71	100,64	48,49		0,93	3,93	10	7,475	3,22		24,03		1,92	105%
	2'	51,31	100,91	49,27		0,50	3,44	10	7,420	2,83		20,99		1,02	92%
	3	51,65	100,36	48,05		0,98	4,08	10	7,506	3,35		25,15		2,05	110%
	3'	51,08	100,46	49,88		0,45	3,59	10	7,378	2,98		21,97		0,90	96%
aged	4	50,44	100,65	48,90	0°C	0,85	4,28	10	7,446	3,59	3,55	26,76	26,42	1,73	101%
	4'	49,96	100,87	49,15		0,86	4,99	10	7,429	4,22		31,33		1,75	119%
	5	49,90	100,91	49,08		0,48	3,75	10	7,434	3,17		23,57		0,97	89%
	5'	51,03	100,58	48,20		0,90	4,63	10	7,496	3,85		28,82		1,87	109%
	6	50,43	101,43	49,21		0,63	4,18	10	7,425	3,48		25,84		1,27	98%
	6'	50,26	101,20	48,96		0,47	3,56	10	7,442	2,98		22,21		0,95	84%

Tab. 42 Parametry zkušebních půválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs BBTM 8NH s 15 % R-materiálu

BBTM 8 s 30 % RA	Těleso	Šířka	Délka	Výška	T _{zkoušky}	Přetvoření	Síla	Hloubka drážky	Faktor f	Napětí při porušení	Kritická hodnota		Přetvoření		Rozdíl od průměru
		b	l	h		Δ	F	a _i	f(a _i /W _i)	σ _{max,i}	K _{ic,i}	ε _{max,i}			
		(mm)	(mm)	(mm)		(mm)	(kN)	(mm)	(-)	(MPa)	(N/mm ²)	(%)			
virgin	1	51,12	100,99	48,72	0°C	0,73	4,68	10	7,459	3,86	3,82	28,79	28,40	1,50	101%
	1'	51,19	101,46	48,98		0,61	5,08	10	7,441	4,17		31,00		1,24	109%
	2	50,43	101,31	47,89		0,57	4,30	10	7,518	3,59		26,98		1,19	95%
	2'	51,48	101,64	49,98		0,55	4,04	10	7,371	3,29		24,23		1,09	85%
	3	50,64	102,08	48,83		0,49	4,94	10	7,451	4,07		30,32		1,00	107%
	3'	49,47	102,92	50,21		0,68	4,72	10	7,356	3,95		29,07		1,34	102%
aged	4	50,11	100,98	48,98	0°C	3,45	3,18	10	7,441	2,68	2,35	19,90	17,45	7,04	114%
	4'	50,35	101,13	48,95		3,47	2,75	10	7,443	2,30		17,10		7,09	98%
	5	50,06	100,36	48,11		2,89	2,56	10	7,502	2,17		16,27		6,01	93%
	5'	50,44	100,85	49,61		3,15	2,96	10	7,397	2,48		18,35		6,34	105%
	6	49,51	100,80	49,38		3,16	2,71	10	7,413	2,31		17,13		6,39	98%
	6'	48,31	101,44	48,78		2,60	2,46	10	7,455	2,14		15,95		5,33	91%

Tab. 43 Parametry zkušebních půválcových těles a výsledky zkoušky šíření trhliny dle normy ČSN EN 12697-44 pro směs BBTM 8NH s 30 % R-materiálu

9.4 Protokoly ze zkoušky poježdění kolem

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím					
provedeno dle ČSN EN 12697-22					
Zkouška opakovaného poježdění kolem					
objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 8 NH (s 0% RA)		
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65		
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1		100,1	%
datum výroby vzorku	07.05.18	MZ vzorku č.2		100,5	%
datum zkoušky	09.05.18	tloušťka desky 1		39,98	mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2		39,99	mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek		39,99	mm

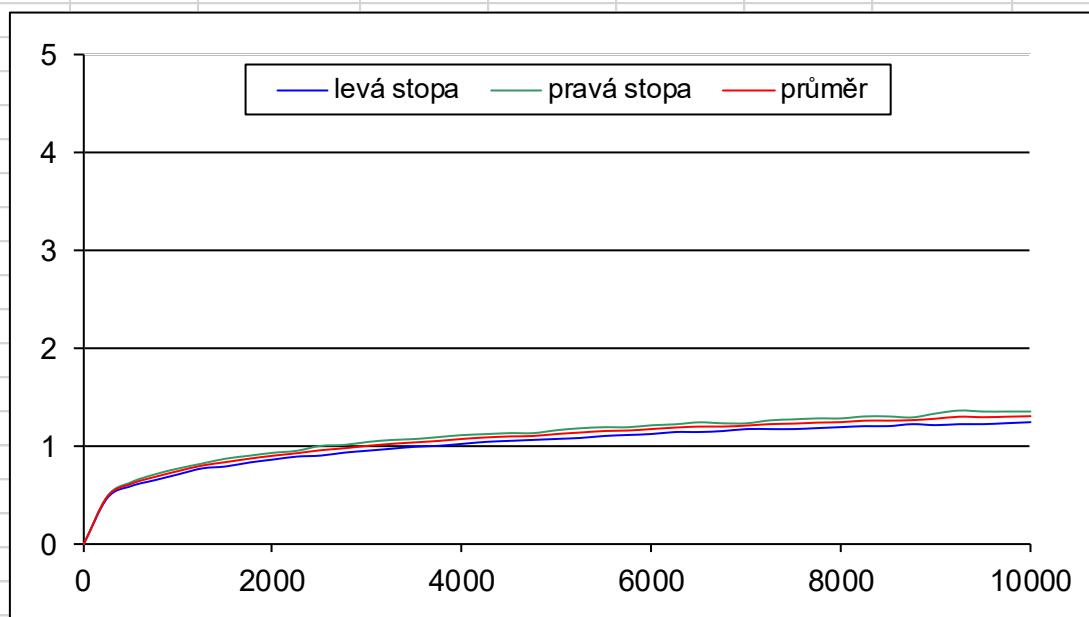
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,71	2,03	0,32	
2	1,81	2,37	0,56	
průměr	1,76	2,20	0,44	
přírůstek hloubky koleje WTS _{AR}	$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$		0,088	mm
PRD _{AR}			4,4	%

Tab. 44: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 8NH s 0 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím
provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 8 NH (s 15% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	100,4 %
datum výroby vzorku	06.05.18	MZ vzorku č. 2	100,3 %
datum zkoušky	07.05.18	tloušťka desky 1	40,57 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	41,19 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,88 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,07	1,24	0,17	
2	1,16	1,35	0,19	
průměr	1,12	1,30	0,18	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,036	mm
PRD_{AIR}			2,7	%

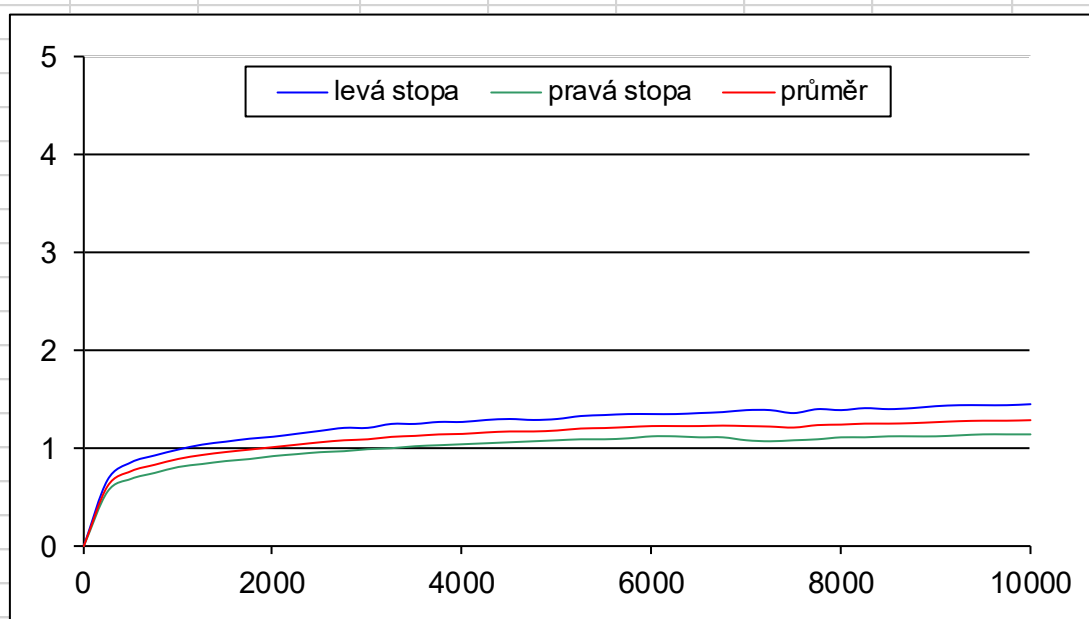
Tab. 45: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 8NH s 15 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 8 NH (s 30% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	102,0 %
datum výroby vzorku	06.05.18	MZ vzorku č. 2	101,6 %
datum zkoušky	10.05.18	tloušťka desky 1	40,03 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	40,03 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,03 mm



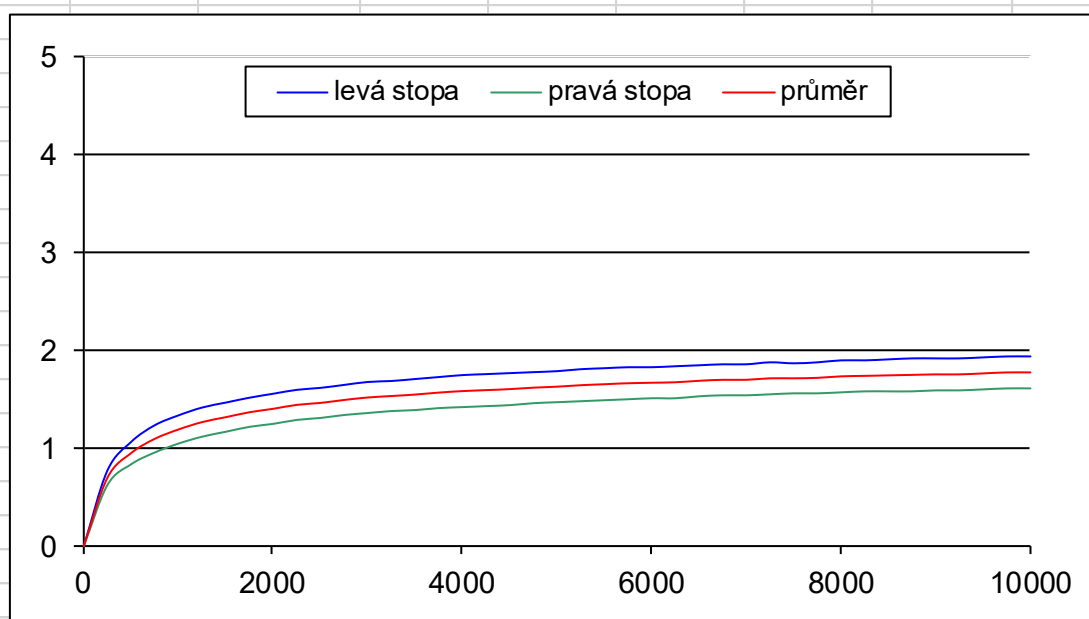
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,29	1,44	0,15	
2	1,07	1,13	0,06	
průměr	1,18	1,29	0,11	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,021	mm
PRD_{AIR}			2,9	%

Tab. 46: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 8NH s 30 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím
provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 22 L (s 0% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 25/55-60
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	100,0 %
datum výroby vzorku	15.05.18	MZ vzorku č. 2	100,0 %
datum zkoušky	17.05.18	tloušťka desky 1	50,00 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	50,00 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	50,00 mm



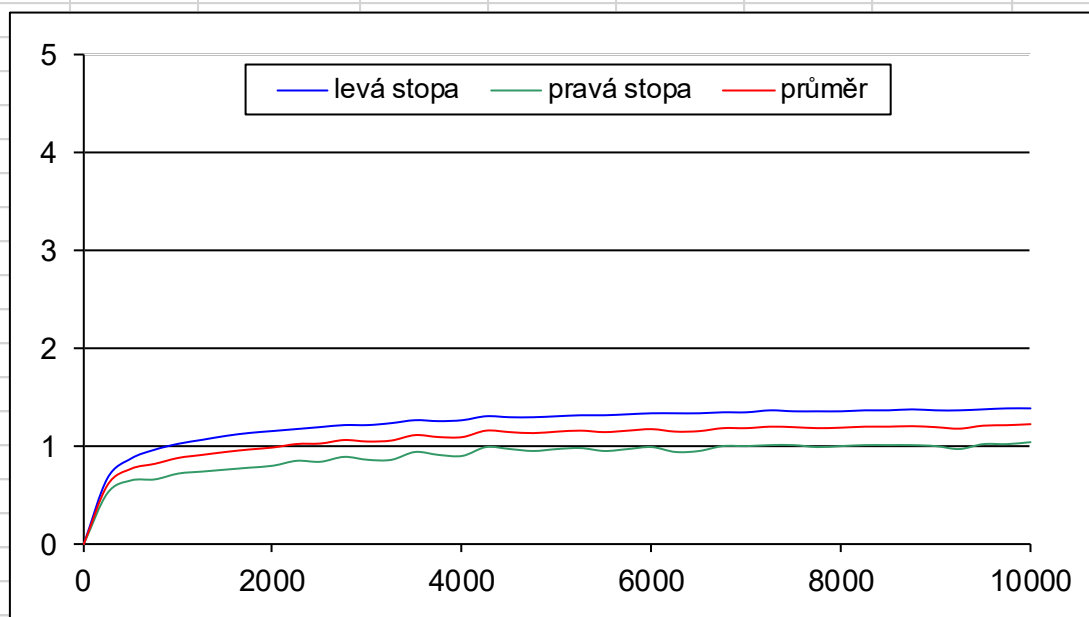
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,78	1,93	0,15	
2	1,46	1,60	0,14	
průměr	1,62	1,77	0,15	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,029	mm
PRD_{AIR}			3,2	%

Tab. 47: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 22L s 0 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím
provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 22 L (s 30% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 25/55-60
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	105,4 %
datum výroby vzorku	02.05.18	MZ vzorku č. 2	104,9 %
datum zkoušky	03.05.18	tloušťka desky 1	51,64 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	52,03 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	51,84 mm



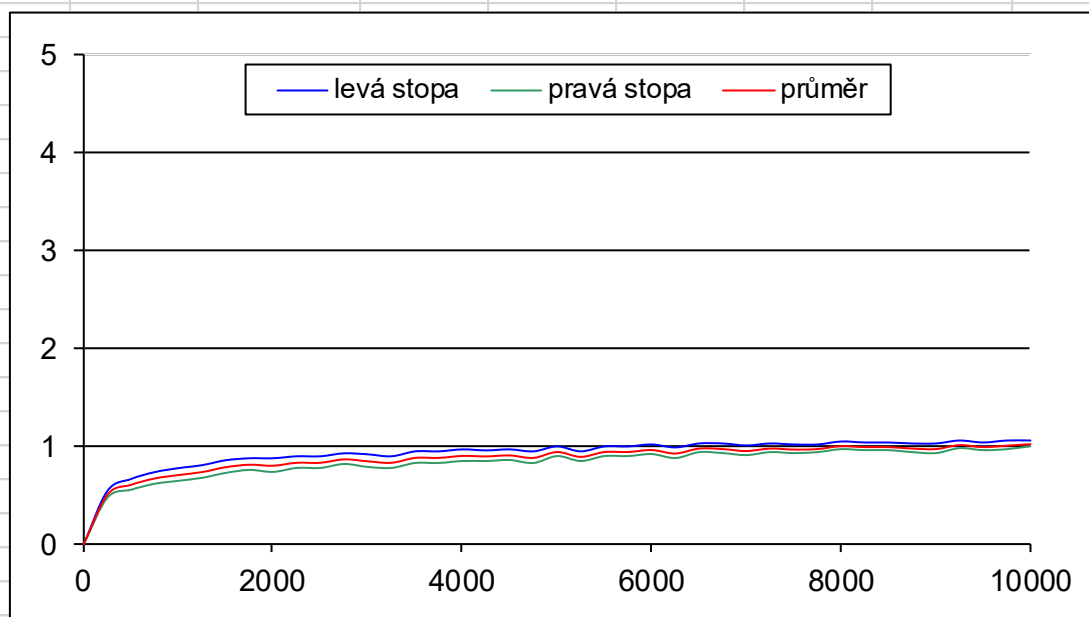
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,30	1,38	0,08	
2	0,97	1,04	0,07	
průměr	1,14	1,21	0,08	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,015	mm
PRD_{AIR}			2,2	%

Tab. 48: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 22L s 30 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím
provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	SMA 22 L (s 50% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 25/55-60
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	101,9 %
datum výroby vzorku	2.5.2018.5.2018	MZ vzorku č. 2	102,3 %
datum zkoušky	04.05.18	tloušťka desky 1	52,41 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	52,71 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	52,56 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	0,99	1,05	0,06	
2	0,89	0,99	0,10	
průměr	0,94	1,02	0,08	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,016	mm
PRD_{AIR}			1,8	%

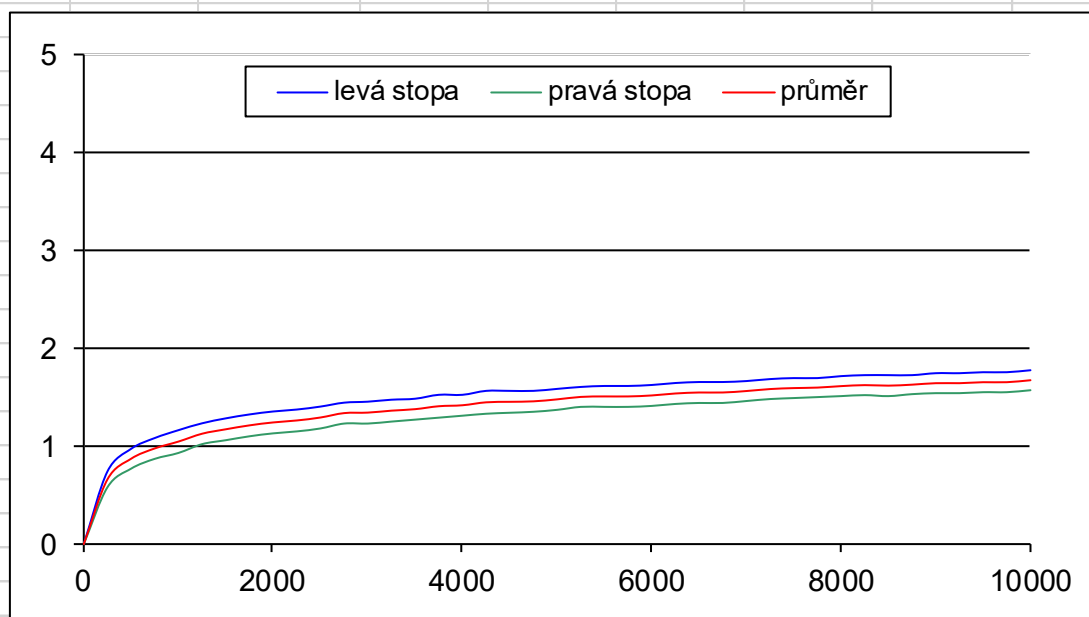
Tab. 49: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi SMA 22L s 50 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	BBTM 8 NH (s 0% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	101,1 %
datum výroby vzorku	27.04.18	MZ vzorku č. 2	101,1 %
datum zkoušky	02.05.18	tloušťka desky 1	40,48 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	40,67 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,58 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,58	1,77	0,19	
2	1,37	1,57	0,20	
průměr	1,48	1,67	0,20	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,039	mm
PRD_{AIR}			3,6	%

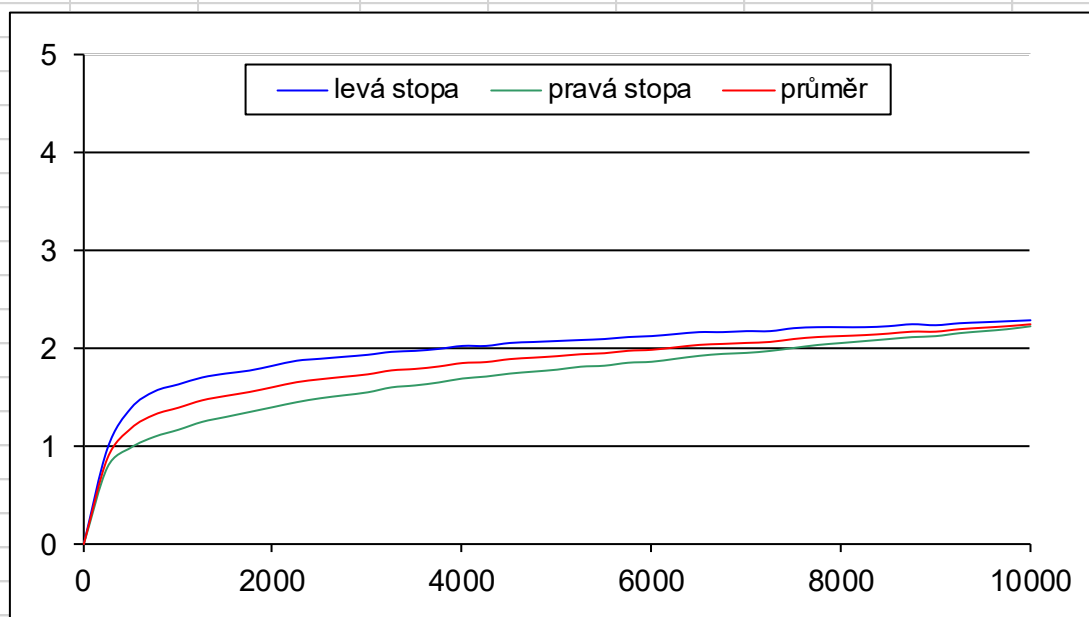
Tab. 50: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi BBTM 8NH s 0 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím

provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	BBTM 8H (s 15% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65
číslo objednávky:		MZ vzorku č. 1	99,0 %
datum výroby vzorku	10.05.18	MZ vzorku č. 2	99,1 %
datum zkoušky	15.05.18	tloušťka desky 1	40,02 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	40,01 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,02 mm



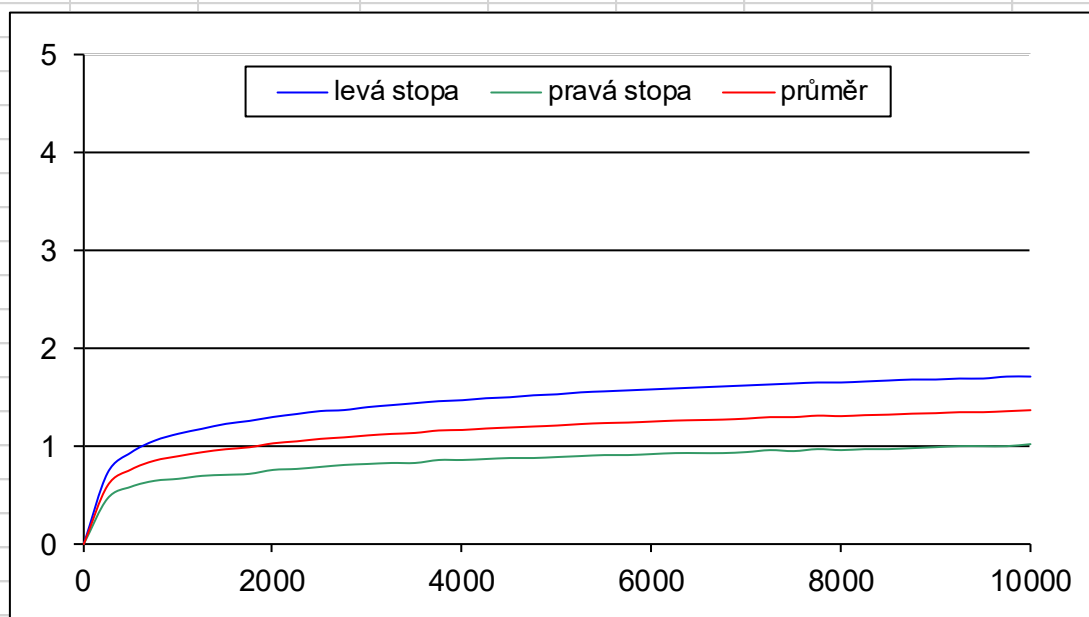
kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	2,06	2,27	0,21	
2	1,77	2,21	0,44	
průměr	1,92	2,24	0,33	
přírůstek hloubky koleje WTS_{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,065	mm
PRD_{AIR}			4,8	%

Tab. 51: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi BBTM 8NH s 15 % R-materiálu

Zkouška odolnosti asfaltových směsí proti trvalým deformacím
provedeno dle ČSN EN 12697-22

Zkouška opakovaného poježdění kolem

objednavatel:	Froněk spol. s r.o.	druh směsi	BBTM 8 NH (s 30% RA)
výrobce	FSv ČVUT v Praze	druh pojiva	PMB 45/80-65
číslo objednávky:		MZ vzorku č.1	101,8 %
datum výroby vzorku	24.04.18	MZ vzorku č.2	101,5 %
datum zkoušky	25.04.18	tloušťka desky 1	40,65 mm
teplota přípravy těles	160 °C	tloušťka desky 2	41,15 mm
teplota zkoušky	50 °C	průměrná tloušťka desek	40,90 mm



kolo	průměrná hloubka koleje po 5 000 cyklech v mm	průměrná hloubka koleje po 10 000 cyklech v mm	d _{10 000} - d _{5 000} (mm)	
1	1,52	1,70	0,18	
2	0,88	1,01	0,13	
průměr	1,20	1,36	0,16	
přírůstek hloubky koleje WTS _{AIR}		$\frac{d_{10\,000} - d_{5\,000}}{5}$	0,031	mm
PRD _{AIR}			2,9	%

Tab. 52: Stanovení odolnosti proti trvalým deformacím u asfaltové směsi BBTM 8NH s 30 % R-materiálu